



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola Superior d'Agricultura de Barcelona**

# Análisis del funcionamiento de la depuradora de aguas residuales de Ecoparc de Barcelona en el periodo 2017-2018

Trabajo de fin de grado  
Ingeniería de Sistemas Biológicos

Autor: Sandro Kvantaliani

Tutores: Teresa Balanyà Martí

Marta Ginovart Gisbert

10 / Junio / 2019

## **Agradecimientos**

El autor agradece a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo. Quiero agradecer a la empresa Ecoparc de Barcelona por haberme dado la oportunidad de formar parte del equipo. Quiero agradecer a Eduardo Jimenez Conde, mi tutor en la empresa, que me proporciono toda la información y ayuda durante mi estancia en las practicas.

Especial agradecimiento a mi familia por darme todo su apoyo y tiempo durante todo el proceso. Agradezco a mi hermana pequeña por tener tanta paciencia conmigo.

Agradezco a mis tutores Teresa Balanyà Martí y Marta Ginovart Gisbert por el tiempo que me dedicaron, por su esfuerzo a corregir mis errores, darme consejos y ayudarme con la estadística, gracias por todo.

## **Resum**

En el present treball es realitza un estudi de funcionament de la depuradora d'Ecoparc de Barcelona on es tracta una aigua residual d'alta càrrega procedent del procés de tractament dels residus sòlids urbans a què es dedica l'empresa. El sistema es basa en el tractament de fangs actius utilitzant mètode de nitrificació-desnitrificació, La separació de la biomassa depuradora es realitza per ultrafiltració i finalment per reduir el contingut en sals es disposa d'una osmosi inversa.

L'objectiu del present treball és analitzar les dades recollides durant els anys 2017 i 2018 de la depuradora d'Ecoparc de Barcelona en relació a les variables pH, conductivitat, alcalinitat, demanda química d'oxigen, demanda bioquímica d'oxigen, nitrogen amoniacal i nitrats, per caracteritzar el seu funcionament i detectar possibles anomalies.

Les dades obtingudes dels dos anys mostrejats (2017 i 2018) primer s'han estudiat de manera conjunta per tenir una visió general de característiques de les aigües residuals i rendiment del procés. Després s'han classificat i estudiat per períodes estacionals.

Respecte a les característiques de l'aigua a tractar s'ha constatat que es tracta d'una aigua residual amb un altíssim contingut en DQO i nitrogen amoniacal el que justifica la complexitat de la instal·lació, així com que està treballant amb unes concentracions d'aquests contaminants superiors a les considerades per al seu disseny.

Pel que fa al funcionament de la depuració s'observa una alta eficiència en l'eliminació de DQO (97,3% eliminació) obtenint-se una DQO de sortida adequada per al seu abocament al clavegueram (1500 mg / L) en el 91% dels mostrejos. L'eliminació d'amoni també és alta, encara que quedant a un percentatge d'eliminació relativament menor que la de DQO, arribant a un valor de 78,2%.

De l'estudi estacional no s'ha pogut determinar cap patró en les característiques de les aigües d'entrada. La tercera estació de 2017 ha tingut un comportament inusual comparant amb altres estacions, obtenint-se diferències estadísticament significatives per a la DQO i N-NH<sub>4</sub> + sortida fa a la resta d'estacions. Els valors màxims assolits en els dos casos indiquen que el sistema de depuració biològica ha tingut algun tipus d'anomalia important. Les dades recollides indiquen que el problema va poder ser la manca d'alcalinitat. Durant l'any 2018 es constata que aquest problema no s'ha tornat a repetir.

## **Resumen**

En el presente trabajo se realiza un estudio de funcionamiento de la depuradora de Ecoparc de Barcelona donde se trata un agua residual de alta carga procedente del proceso de tratamiento de los residuos sólidos urbanos a que se dedica la empresa. El sistema se basa en el tratamiento de lodos activos utilizando método de nitrificación-desnitrificación, La separación de la biomasa depuradora se realiza por ultrafiltración y finalmente para reducir el contenido en sales se dispone de una osmosis inversa.

El objetivo del presente trabajo es analizar los datos recogidos durante los años 2017 y 2018 de la depuradora de Ecoparc de Barcelona en relación a las variables pH, conductividad, alcalinidad, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno amoniacal y nitratos, para caracterizar su funcionamiento y detectar posibles anomalías.

Los datos obtenidos de los dos años muestreados (2017 y 2018) primero se han estudiado de forma conjunta para tener una visión general de características de las aguas residuales y rendimiento del proceso. Después se han clasificado y estudiado por periodos estacionales.

Respecto a las características del agua a tratar se ha constatado que se trata de un agua residual con un altísimo contenido en DQO y nitrógeno amoniacal lo que justifica la complejidad de la instalación, así como que está trabajando con unas concentraciones de estos contaminantes superiores a las consideradas para su diseño.

Respecto al funcionamiento de la depuración se observa una alta eficiencia en la eliminación de DQO (97,3 % de eliminación) obteniéndose una DQO de salida adecuada para su vertido al alcantarillado (1500 mg/L) en el 91% de los muestreos. La eliminación de amonio también es alta, aunque quedando a un porcentaje de eliminación relativamente menor que la de DQO, llegando a un valor de 78,2 %.

Del estudio estacional no se ha podido determinar ningún patrón en las características de las aguas de entrada. La tercera estación de 2017 ha tenido un comportamiento inusual comparando con otras estaciones, obteniéndose diferencias estadísticamente significativas para la DQO y  $\text{N-NH}_4^+$  salida respecto al resto de estaciones. Los valores máximos alcanzados en los dos casos indican que el sistema de depuración biológica ha tenido algún tipo de anomalía importante. Los datos recogidos indican que el problema pudo ser la falta de alcalinidad. Durante el año 2018 se constata que este problema no se ha vuelto a repetir.

## **Abstract**

In the present work a study of the functioning of the Ecoparc de Barcelona wastewater treatment plant is carried out, where a high load wastewater is treated from the process of treatment of the solid urban waste to which the company is dedicated. The system is based on the treatment of active sludge using the nitrification-denitrification method. The separation of the sewage biomass is carried out by ultrafiltration and finally, to reduce the salt content, a reverse osmosis is available.

The objective of this work is to analyse the data collected during the years 2017 and 2018 of the Ecoparc de Barcelona treatment plant in relation to the variables pH, conductivity, alkalinity, chemical oxygen demand, biochemical oxygen demand, ammonia nitrogen and nitrates, for characterize its operation and detect possible anomalies.

The data obtained from the two sampled years (2017 and 2018) have first been studied together to have an overview of wastewater characteristics and process performance. Then they have been classified and studied for seasonal periods.

Regarding the characteristics of the water to be treated, it has been verified that it is a wastewater with a very high content of COD and ammoniacal nitrogen, which justifies the complexity of the installation, as well as that it is working with concentrations of these pollutants higher than the considered for your design.

Regarding the operation of the purification, a high efficiency in the elimination of COD (97,3% of elimination) is observed, obtaining an output COD suitable for its discharge to the sewerage system (1500 mg/L) in 91% of the samplings. The elimination of ammonium is also high, although leaving a percentage of elimination relatively lower than that of COD, reaching a value of 78,2%.

From the seasonal study it has not been possible to determine any pattern in the characteristics of the entrance waters. The third season of 2017 has had an unusual behaviour compared to other stations, obtaining statistically significant differences for the COD and  $\text{N-NH}_4^+$  output with respect to the rest of the stations. The maximum values reached in both cases indicate that the biological purification system has had some type of important anomaly. The data collected indicate that the problem could be the lack of alkalinity. During the year 2018 it is noted that this problem has not been repeated.

# Índice

<b>SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS.....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Depuración de aguas residuales .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Proceso de nitrificación-desnitrificación (NDN) .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Ecoparc de Barcelona.....</b>	<b>9</b>
<b>4. Justificación del trabajo .....</b>	<b>10</b>
<b>5. Objetivos del trabajo .....</b>	<b>10</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Geolocalización de Ecoparc de Barcelona.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Características de la depuradora de Ecoparc de Barcelona.....</b>	<b>12</b>
2.1. Descripción de la instalación .....	13
2.2. Sistemas de control de la depuradora.....	16
<b>3. Muestreo y metodología analítica .....</b>	<b>18</b>
<b>4. Análisis estadístico .....</b>	<b>20</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>21</b>
<b>1. Análisis conjunto de los datos de los dos años .....</b>	<b>21</b>
1.1. pH.....	21
1.2. Conductividad .....	23
1.3. Alcalinidad .....	26
1.4. DQO, demanda química de oxígeno .....	28
1.5. DBO, demanda bioquímica de oxígeno .....	31
1.6. N-NH <sub>4</sub> , nitrógeno amoniacal.....	32
1.7. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Nitratos .....	36
<b>2. Análisis de los datos por estaciones .....</b>	<b>37</b>
2.1 pH.....	37
2.2 Conductividad .....	42
2.3 Alcalinidad .....	45
2.4 DQO, demanda química de oxígeno .....	49
2.5 N-NH <sub>4</sub> , Nitrógeno amoniacal.....	53
2.6 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Concentración de nitratos.....	57
<b>3. Comparación de los parámetros de funcionamiento de los reactores         biológicos .....</b>	<b>59</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>61</b>

## **Símbolos y acrónimos**

*AR*: Agua residual

*CV*: Coeficiente de variación

*DBO*: Demanda bioquímica de oxígeno

*DN*: Desnitrificación

*DQO*: Demanda química de oxígeno

*MES*: Materias en suspensión

*N1*: Reactor 1 de nitrificación

*N2*: Reactor 2 de nitrificación

*NDN*: Nitrificación-desnitrificación

*N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>*: Ion nitrógeno amoniacal

*NO<sub>3</sub><sup>-</sup>*: Ion nitrato

*OI*: Osmosis inversa

*pH*: Coeficiente del grado de acidez o basicidad

*Post-DN*: Post-desnitrificación

*Q1*: Primer cuartil o percentil 25

*Q3*: Tercer cuartil o percentil 75

*RSU*: Residuo solido urbano

*SST*: Solidos suspendidos totales

*SSV*: Solidos suspendidos volátiles

*TKN*: Nitrógeno total Kjeldahl

*UF*: Ultrafiltración

# Introducción

## 1. Depuración de aguas residuales

Hoy en día existen varios tipos de tratamiento de aguas residuales; **físicos, químicos y biológicos**. Estos tratamientos por separado o combinados pueden reducir el impacto ambiental del vertido.

En el presente trabajo nos centramos en el tratamiento biológico de agua residual. Este tipo de tratamiento tiene como objetivo degradar o absorber la materia disuelta o la que está en forma coloidal.

El proceso de la depuración biológica se basa en la función natural de las bacterias para cerrar los ciclos de su vida aprovechando diferentes sustratos específicos para cada tipología de bacterias. Con el diseño de la planta depuradora se crean nichos ecológicos para el crecimiento óptimo de bacterias específicas que son las más adaptadas para aquel entorno concreto. Recientemente ha sido descubierto un nuevo grupo microbiano, las bacterias anaerobias oxidadoras de amonio o bacterias Anammox (Mulder et al. 1995). Éstas oxidan amonio a nitrógeno molecular ( $N_2$ ) usando nitrito como aceptor de electrones bajo condiciones anóxicas. Aunque este 'atajo' en el ciclo del N fue descubierto recientemente, se demostró que las bacterias Anammox se encuentran fácilmente en los sistemas naturales.

En la depuración biológica se han desarrollado diferentes sistemas de tratamiento para las aguas residuales provenientes de orígenes diferentes. Tenemos tratamientos **aerobios** y **anaerobios** o la **combinación** de las dos opciones. Uno de los sistemas más utilizado es el proceso de lodos activados que además de la eliminación de materia orgánica puede incluir la eliminación de nitrógeno mediante etapas de **nitrificación** y **desnitrificación**. Este sistema se denomina NDN (nitrificación-desnitrificación) y es el que utiliza la depuradora del Ecoparc de Barcelona, objeto de este estudio.

## 2. Proceso de nitrificación-desnitrificación (NDN)

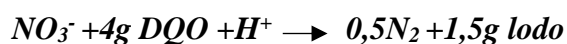
En un proceso de depuración biológica NDN se eliminan compuestos de nitrógeno y carbono. Normalmente se prevé una eliminación de DQO alrededor de **90%** y de  $NH_4^+$  del **98%**. La degradación de compuestos biológicos se consigue gracias a ciertos microorganismos, los cuales participan en diferentes fases de la depuración biológica para al final conseguir un agua con una mínima cantidad de DQO y  $NH_4^+$ .

Aunque la secuencia del proceso sería primero nitrificación y después desnitrificación la configuración más utilizada es desnitrificación- nitrificación ya que ello permite tener sustrato orgánico que proviene del agua a tratar para la desnitrificación.



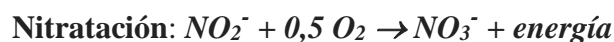
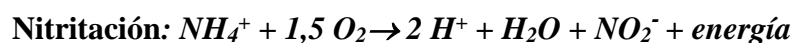
La desnitrificación es el primer proceso del sistema NDN. Es un proceso anóxico por lo que no necesita aportación de oxígeno. La degradación se realiza por actividad de bacterias heterótrofas y que por lo tanto su fuente de carbono será orgánica y como aceptor de electrones en la respiración utilizarán los nitratos que se reducirán a nitrógeno gas. Los nitratos provienen del tanque de nitrificación (posterior) mediante la recirculación de agua desde este tanque al de desnitrificación situado en el inicio de la línea.

La estequiometría de desnitrificación es la siguiente (Torre 2014):



La nitrificación es un proceso aerobio que consiste transformar el amonio en nitratos. Para su crecimiento, las bacterias nitrificantes utilizan fuente de carbono inorgánico.

La estequiometría de nitrificación se divide en dos partes, la nitrificación y la nitratación (Torre 2014):



Como resultado de las dos reacciones tenemos:



La primera condición o factor de selección que se usa es la temperatura. La oxidación de amonio es más sensible a cambios de temperatura que la oxidación de nitrito. Otro factor importante a tener en cuenta más tratándose de un efluente de los digestores es el pH. El pH se mantiene por medio de la liberación de CO<sub>2</sub>. La respuesta del pH es muy sensible debido a que, en general, el sistema será operado bajo condiciones donde difícilmente se mantendrá un efecto tampón o buffer. Una conversión de 7mg de N-amoniaco generará 1mM de protones o un descenso de pH a un valor de 3 ante la ausencia de una solución amortiguadora (Tobergte y Curtis 2013). Por ello, cambios leves de las conversiones tendrán un impacto significativo en el nivel de pH. Para una nitrificación sin problemas se recomienda mantener el pH entre 7,2 y 9.

La nitrificación y desnitrificación son reacciones exotérmicas; esto significa que el proceso de conversión tiene un impacto significativo en la temperatura del reactor. No es necesario un control preciso de la temperatura; sin embargo, es preferible operar el proceso a temperaturas mayores a 25°C y menores a 40°C.

Cuando el oxígeno es limitante las *Nitrosomonas* pueden combinar hidroxilamina con nitrito generando óxido nitroso (Bock, 1995). Bajo condiciones anóxicas y en presencia de nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) los microorganismos pueden convertir amonio a monóxido de nitrógeno (NO) gas (Schmidt et al. 2002). Ambas conversiones permiten la eliminación de amonio de la fase líquida, aunque claramente esto no es deseable ya que los productos finales son tóxicos o bien son gases que contribuyen fuertemente al efecto invernadero.

La mayor parte de nitratos se transforman en nitrógeno gas en el tanque de desnitrificación inicial debido a la recirculación de nitratos, pero para rebajar la concentración de  $\text{NO}_3^-$  a niveles exigidos se coloca otro tanque anoxico (post-DN) al final de la línea. Debido a la falta de materia orgánica en este último proceso puede ser necesario la adición de metanol (como fuente de carbono), ya que la mayor parte de materia orgánica se consume en la primera etapa.

### 3. Ecoparc de Barcelona

La planta de tratamiento de residuos urbanos de Ecoparc de Barcelona trata de manera integral los residuos urbanos (contenedor marrón y gris) que se genera en el área metropolitana de Barcelona. Según los datos de 2017 la planta recibió y trato a 240.509,16 toneladas de residuo.

El proceso que siguen puede dividirse en 3 grandes fases que son **pre-tratamiento**, **metanización** con **cogeneración** y **compostaje**.

La función del pretratamiento es separar la materia orgánica de los materiales reciclables y de otros impropios que no pueden aprovecharse (el rechazo de la planta). La materia orgánica de recogida selectiva se destina a metanización y la materia orgánica del resto se envía a compostaje.

En el proceso de metanización se obtiene **biogás** aprovechando la materia orgánica recibida. Este proceso se realiza tanques de digestión anaerobia de 6700 m<sup>3</sup> de capacidad.

El biogás generado se almacena a un gasómetro de donde se envía a la central de cogeneración. En el proceso de cogeneración la combustión de biogás genera la electricidad que se exporta a la red, y calor, que a su vez se utiliza para mantener la temperatura de los digestores estable a 37 °C.

El compostaje es un proceso de descomposición de materia orgánica controlada para conseguir la estabilización e higienización del material y así obtener un compost aplicable en la agricultura y jardinería.

Durante la metanización y compostaje se generan aguas residuales y lixiviados con altos niveles de contaminantes, para su tratamiento la instalación se dispone de una planta depuradora de agua residual consiguiendo rebajar concentraciones de los contaminantes a niveles exigidos por las autoridades locales (Tabla 3 de requisitos).

#### **4. Justificación del trabajo**

He realizado dos estancias de prácticas en la depuradora de la empresa Ecoparc de Barcelona entre 15 de junio y 5 de septiembre de 2017 y entre 5 de junio y 7 de septiembre de 2018. A raíz de las problemáticas observadas en el funcionamiento de la instalación en estos periodos de tiempo y con el consentimiento de la empresa se consideró interesante analizar los datos disponibles de los dos años para poder determinar posibles dinámicas que ayuden mejorar el funcionamiento de la depuradora de Ecoparc de Barcelona.

#### **5. Objetivos del trabajo**

El objetivo del presente trabajo es analizar los datos recogidos durante los años 2017 y 2018 de la depuradora de Ecoparc de Barcelona en relación a las variables pH, conductividad, alcalinidad, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno amoniacal y nitratos para caracterizar su funcionamiento y detectar posibles anomalías.

## Materiales y métodos

### 1. Geolocalización de Ecoparc de Barcelona

La planta de tratamiento de residuos urbanos de Ecoparc de Barcelona se encuentra en la siguiente dirección C/ A, nº 26 (Zona Franca) 08040 Barcelona. En el mapa podemos ver la geolocalización de la planta.



**Fig. 1 Localización geográfica de planta de tratamientos de RSU Ecoparc de Barcelona**

## 2. Características de la depuradora de Ecoparc de Barcelona

Las aguas recogidas en el Ecoparc de Barcelona en gran medida provienen de la digestión anaerobia de los residuos urbanos que forma parte del proceso de tratamiento de los residuos sólidos urbanos (R.S.U). Los datos sobre los que se basó el diseño de la instalación se muestran en la Tabla 1. El agua residual a tratar es muy diferente de lo que sería un agua residual doméstica. En la tabla 1 se representa valores típicos de agua residual doméstica.

**Tabla 1: Concentración de parámetros de agua residual domestica**

*Metclaf i Eddy, 2003*

<b>Parámetros contaminantes</b>	<b>Concentración de los parámetros (mg/L)</b>
DQO	430
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	25
N-NTK	40
pH	7,5

Las reglamentaciones locales referentes a las aguas residuales contemplan unos límites de vertido de agua, los cuales deben ser conseguidos por un tratamiento específico. En base a las reglamentaciones vigentes se diseñó una planta de la depuradora para poder cumplir los requisitos necesarios antes del vertido o reutilización de agua en exceso (agua depurada obtenida se puede reutilizar para el lavado de las membranas de ultrafiltración pg.15).

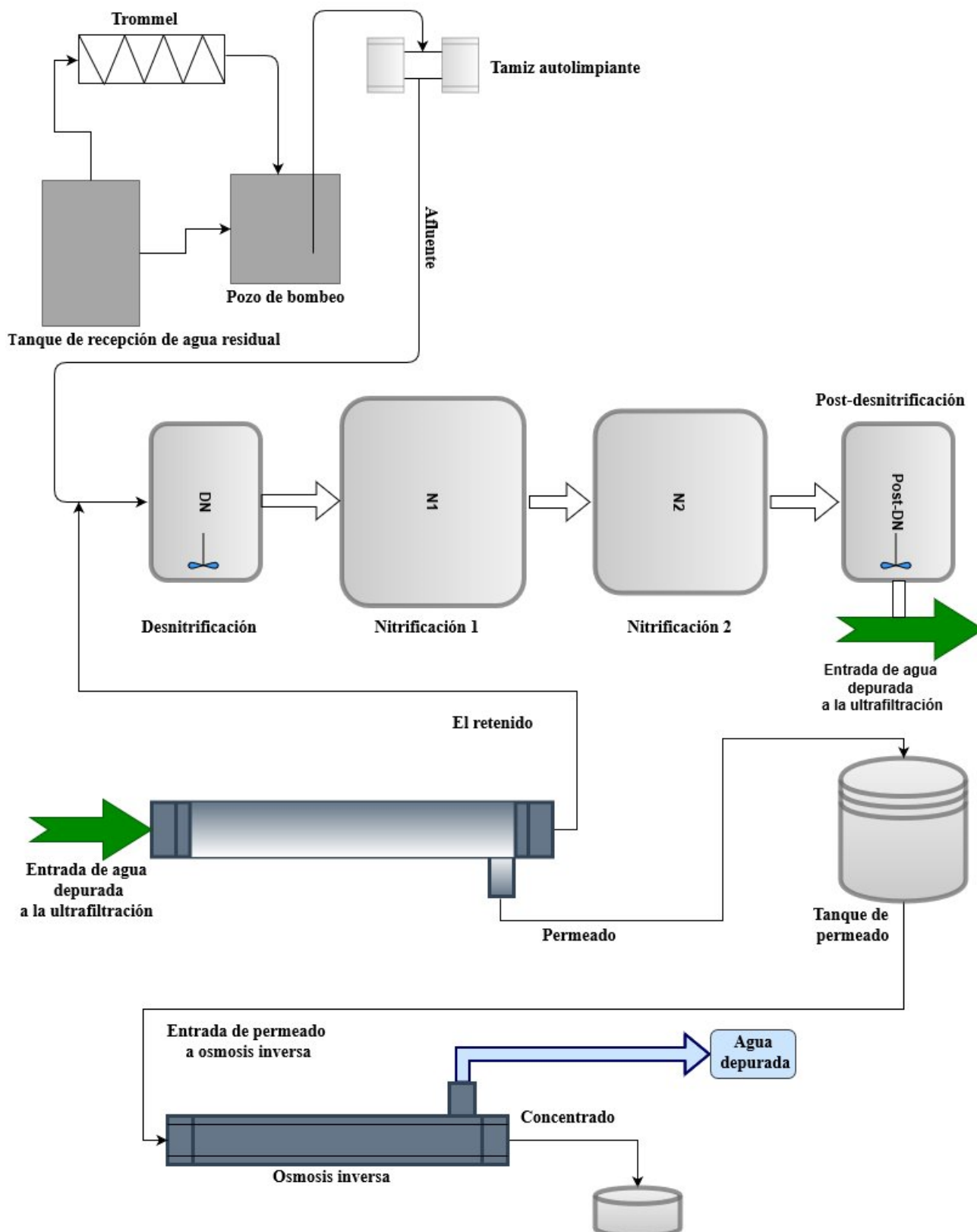
Las características del agua residual que se consideraron como datos para el diseño de la instalación se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2: Datos de diseño de la depuradora de Ecoparc de Barcelona**

<b>Parámetros de contaminantes</b>	<b>Concentración de entrada Datos de diseño (mg/L)</b>	<b>Concentración en vertido final (mg/L)</b>
DQO	15.500	1.500
N-NH <sub>4</sub>	2.700	50
N Kjeldah (NTK)	3.300	70
pH	7,9-8,4	6-10
<b>Caudal de agua residual a tratar (diseño) 186 m<sup>3</sup>/d</b>		

## 2.1. Descripción de la instalación

En la figura 2 representamos de manera resumida el flujo de agua residual en el sistema de la depuración biológica.



**Fig. 2 Esquema general de flujo de agua residual**

Inicialmente el agua pasa por un proceso de pretratamiento con la finalidad de separar sólidos en suspensión. La siguiente etapa es el proceso NDN. En el primer reactor (DN) se aprovechan los compuestos carbonosos biodegradables existentes en el agua de entrada y con ello se reduce la cantidad de fuente de carbono a dosificar (metanol). En la nitrificación (aireada) se lleva a cabo la degradación **de materias carbonosas y nitrogenadas** y al final en post-desnitrificación se reduce nitrógeno a mínimos para cumplir requisitos.

La separación de la biomasa del agua tratada se realiza mediante ultrafiltración. Esto posibilita la completa retención de la biomasa, así la salida de ultrafiltración queda libre de sólidos en suspensión. Además, con la ultrafiltración se retiene otras sustancias contaminantes y moléculas de cadena larga que se pueden recircular y dejar más tiempo en el reactor para mayor posibilidad de su degradación. Para evitar altas concentraciones de sustancias solidas se realizan purgas puntuales. El permeado de ultrafiltración es sometido a un tratamiento terciario por ósmosis inversa para reducir el contenido en sales y cloruros.

Así pues, el sistema de la depuración biológica está dividido en **tres partes principales**:

**La primera es pretratamiento.** Como se aprecia en la figura 2 antes de que el agua entre en el tanque de DN se pasa por un trommel y luego se filtra por filtros autolimpiantes o tamiz autolimpiante para separar solidos de tamaño de hasta 1,5 mm.

**La segunda es tratamiento biológico** que se realiza a través de 4 tanques o reactores.

- **Tanque 1 de desnitrificación (DN)** con un volumen de **200 m<sup>3</sup>**,
- **Tanque 2 de Nitrificación (N1)** con un volumen de **1.000 m<sup>3</sup>**,
- **Tanque 3 de nitrificación (N2)** de **675 m<sup>3</sup>**,
- **Tanque 4 de post-desnitrificación (post-DN)** con el volumen de **100 m<sup>3</sup>**.

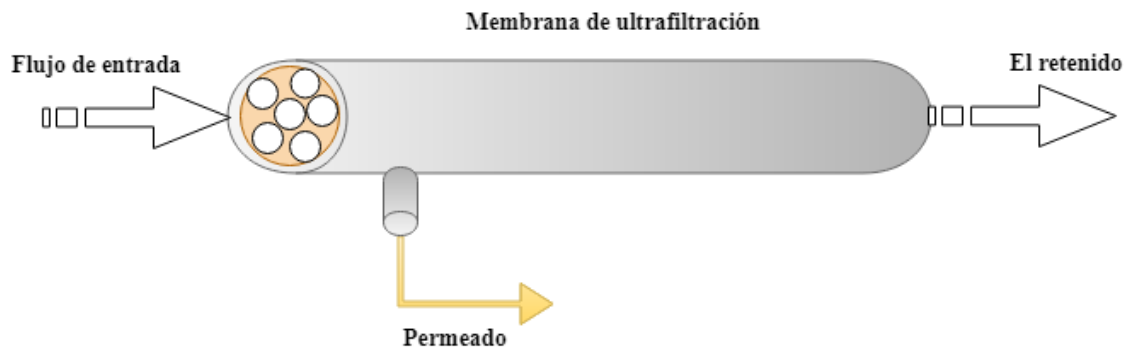
En el primer reactor (DN) se aprovechan los compuestos carbonosos biodegradables existentes en el agua de entrada. En la nitrificación (aireada) se lleva a cabo la **degradación de materias carbonosas y nitrogenadas** y al final en post-desnitrificación se reduce nitrógeno a mínimos para cumplir requisitos.

Los tanques sin aireación (DN y post-DN) tienen agitadores para homogenizar la mezcla y los tanques nitrificantes a su vez tienen soplantes, tres soplantes el N1 y dos el N2 ya que son de volúmenes diferentes. Los soplantes se pueden regular manualmente ficiendo caudal de aireación o automáticamente a través de sensor que mide concentración de oxígeno en el agua de la depuradora que debe estar entre 1 y 3 mg/L.

La purga de lodos se realiza manualmente a través de sistema informático. Es necesario para evitar edad de lodos excesivo y evitar concentración de materia seca en exceso. La cantidad de la purga varía en función de estos parámetros y el supervisor puede regular y elegir el volumen deseado dependiendo de las características de agua residual.

**La tercera es post-tratamiento** para separar partículas de diámetro más pequeño. Tenemos dos tipos de separadores de partículas en serie que son **ultrafiltración y osmosis inversa**.





**Fig. 3 Diagrama general de funcionamiento de la ultrafiltración**

Existen dos líneas de ultrafiltración en paralelo cada una con tres membranas en continuo así se consigue mayor caudal de permeado.

El diámetro de filtración es de  $0,02\mu\text{m}$ , por lo que los solutos de alto peso molecular también son retenidos, mientras que el agua y los solutos de bajo peso molecular atraviesan la membrana. La entrada en la UF se realiza a través de la bomba de circulación aumentando la velocidad de lodos activos y evitando o reduciendo formación de biopelículas. Las dos líneas funcionan al mismo tiempo, aunque si se desea pueden trabajar independientemente entre sí.

El lodo concentrado en la ultrafiltración es transportado de nuevo al reactor de desnitrificación para mantener la concentración de biomasa adecuada. El permeado de ultrafiltración se envía a tanque de permeado y de ahí es transportado a través de una bomba al proceso de osmosis inversa.

Periódicamente se debe realizar lavado químico de membranas. Uno de los indicadores es la disminución de caudal de permeado. Aunque es recomendable un lavado al mes. La empresa tiene un protocolo de cómo se debe realizar el lavado químico para guiar de él.



**Fig. 4 Membranas de ultrafiltración (Ecoparc Barcelona)**

La figura 4 muestra las membranas de ultrafiltración que se utiliza en la depuradora de Ecoparc de Barcelona.



Asimismo, existen dos líneas de osmosis inversa que trabajan por separado. La osmosis inversa (OI) es un proceso de separación basado en la aplicación de alta presión sobre una membrana semipermeable. La osmosis inversa se compone de dos líneas y el agua circula en serie. La presión de operación está limitada a un máximo de 60 bar. Cada línea está compuesta por seis membranas en serie.

Para reducir formación de precipitaciones en las membranas se debe mantener un pH de 6,3. Para ello está prevista una dosificación de ácido sulfúrico. El ácido almacenado en un tanque de 10 m<sup>3</sup> se dosifica mediante una bomba de dosificación situado a la entrada de OI tras el cual se encuentran dos filtros para retener los sólidos que puede contener el permeado y sean perjudiciales para el mantenimiento de las membranas OI. Además del ácido se realiza una dosificación de un desincrustante para evitar formaciones de incrustaciones inorgánicas. Como las membranas de ultrafiltración, las de OI también necesitan lavados químicos y enjuagues periódicos para mantener buen rendimiento de las membranas. Para ello se debe seguir protocolos establecidos previamente y realizar observaciones del sistema.

El permeado de UF se pasa por una bomba de alta presión que posibilita la filtración por las membranas de osmosis inversa. Las bombas de recirculación de la OI proporcionan una velocidad tangencial constante en las membranas. Mediante una válvula manual situada en la tubería de concentrados se puede ajustar la contrapresión necesaria para el rendimiento de caudal de permeado. El concentrado de osmosis se circula hasta el tanque de concentrados para posterior traslado a un gestor autorizado. El clarificado de osmosis inversa cumple requisitos para el vertido de agua en las alcantarillas.

## **2.2. Sistemas de control de la depuradora**

En cualquier industria se necesitan sistemas de control del proceso para poder observar su evolución y poder actuar o sacar conclusiones precisas de los cambios que pueden surgir o de la actividad en sí del sistema. Cuando más complejo es el proceso más difícil es controlarlo y mayores las mediciones que se deben realizar. Lo mismo sucede en caso de una depuradora. El sistema biológico es difícil de controlar porque intervienen diversos factores que pueden ser decisivos para el buen funcionamiento del sistema en su conjunto. Se ha observado que un fallo en un lugar concreto del sistema puede provocar fallos en cadena y desequilibrar todo el proceso de la depuradora.

Los parámetros más controlados son: temperatura, pH, presión de las bombas, refrigeración de la depuradora y algunas características significativas del agua residual.

- La temperatura se mide por las sondas de temperatura colocadas en dos tanques de la depuradora (en N1 y N2). En verano es necesaria la refrigeración de la biomasa bacteriana. La subida de temperatura se ve favorecida por los siguientes motivos:
  - Actividad biológica durante el cual se libera energía
  - Calor liberado por los motores
  - Temperatura de ambiente

Para evitar que no haya influencias nocivas en los microorganismos hay que evitar temperaturas mayores de 40°C, por este motivo se utiliza un intercambiador de calor de placas con dos circuitos, uno de lodo y otro de agua fría en contracorriente, así como una torre de refrigeración para eliminar el calor del circuito de agua. El sistema de refrigeración está controlada automáticamente a través de mediciones de temperatura en los tanques de la depuradora. Además, se controla la temperatura de entrada del permeado en OI ya que temperaturas altas podrían dañar las membranas deformando los poros e inutilizando o bajando el rendimiento.

- Durante la nitrificación se liberan iones de hidrogeno  $H^+$  por lo que dependiendo de la capacidad tampón del sistema, el pH tendera a bajar. Durante la desnitrificación se consumen parte de iones de hidrogeno por lo que se incrementa ligeramente el pH. Entre este equilibrio y la capacidad tampón del agua el pH normalmente se oscila entre 7,5 y 8,5. El valor de pH no debe bajar de 5,8 porque hay peligro de producirse inhibición de la actividad biológica. En este caso se debe aumentar velocidad de desnitrificación y/o dosificar sosa caustica u otra base fuerte.
- La presión de las bombas se mide por los manómetros colocados en los distintos puntos críticos como presión en las membranas de UF o OI. En caso de llegar a una presión máxima las bombas de alimentación se paran automáticamente.
- La caracterización de agua residual se realiza mediante las mediciones de los parámetros que se recoge en el reglamento de servicios públicos de saneamiento. Para verter agua tratada en el alcantarillado se deben cumplir el reglamento que se refiere al **decreto 130/2003 de 13 de mayo**. En el anexo II del mismo decreto se especifican valores límite de los parámetros de agua a verter. En la **tabla 3** se muestran algunos de estos parámetros.

. **Tabla 3** Parámetros de agua residual para el vertido en las alcantarillas publicas

Parámetros	Valor limite	Unidades	
T (°C)	40	°C	
pH (intervalo)	6-10	pH	
MES (Materias en suspensión)	750	mg/l	
DBO5	750	mg/l	O <sub>2</sub>
DQO	1.500	mg/l	O <sub>2</sub>
Aceites i Grasas	250	mg/l	
Cloruros	2.500	mg/l	Cl <sup>-</sup>
Conductividad	6.000	µS/cm	
Dióxido de Azufre	15	mg/l	SO <sub>2</sub>
Sulfatos	1.000	mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Sulfuros Total	1	mg/l	S <sup>2-</sup>
Sulfuros Disuelto	0,3	mg/l	S <sup>2-</sup>
Fósforo total	50	mg/l	P
Nitratos	100	mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Amonio	60	mg/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Nitrógeno orgánico y amoniacal	90	mg/l	N

### 3. Muestreo y metodología analítica

**Durante mi estancia** pude observar cómo se recogían diferentes muestras y alguna vez, cómo las analizaban. **Gracias a la colaboración de la empresa he podido acceder algunos de los datos cruciales para la realización del presente trabajo.** Al final tenemos datos recogidos durante 2 años, entre el 1 de enero de 2017 y 31 de diciembre de 2018. Las muestras se recogían durante la jornada laboral, de lunes a viernes. Por otra parte, algunas de las muestras se recogían y analizaban con periodicidades diferentes.

Es crucial definir puntos de muestreo para entender el estudio realizado de los datos. Como punto de muestra **entrada a la planta** se asigna a muestras recogidas en el **pozo de bombeo** (ver fig. 2) y otro punto de muestreo, **salida de la planta** se asigna muestras recogidas de **permeado** (ver fig. 2).

Durante este periodo de muestreo se han observado diferentes parámetros como los que están controlados por autoridades para el vertido de agua residual. Para este trabajo se han escogido los parámetros **que se muestran en la tabla 4** para caracterizar el agua residual de la depuradora y su funcionamiento. Esta decisión se debe a que los parámetros seleccionados son habitualmente utilizados para el diseño de la depuradora y que juegan un papel decisivo en el comportamiento de la depuración biológica

Tabla 4: Parámetros analizados del sistema para el trabajo realizado

Parámetros	Punto muestreo		Unidades utilizadas
	Entrada	Salida	
pH	√	√	--
Conductividad eléctrica	√	√	mS/cm a 25°C
Alcalinidad	√	√	mg/L
DQO	√	√	mg/l
DBO <sub>5</sub>	√		mg/l
N-NH <sub>4</sub>	√	√	mg/l
TKN	√		mg/l
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		√	mg/l

La realización de análisis de las muestras se ha realizado siguiendo normas establecidas en la tabla 5 se representa los parámetros analizados y respectivas normas utilizadas.

**Tabla 5: Métodos analíticos utilizados para cada parámetro analizado**

<b>Parámetros</b>	<b>Método analítico</b>
<b>DQO entrada</b>	UNE 77004
<b>DBO5 entrada</b>	UNE-EN 1899-1
<b>N-NH4 entrada</b>	ISO 14911
<b>TKN entrada</b>	UNE-EN 25663
<b>Conductividad entrada</b>	UNE-EN 27888
<b>Alcalinidad entrada</b>	UNE-EN ISO 9963-1
<b>pH entrada</b>	UNE-EN ISO 10523
<b>pH entrada</b>	UNE-EN ISO 10523
<b>Conductividad salida</b>	UNE-EN 27888
<b>DQO salida</b>	UNE 77004
<b>N-NH4 salida</b>	ISO 14911
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> salida</b>	ISO 15923-1:2013
<b>Alcalinidad salida</b>	UNE-EN ISO 9963-1
<b>Eliminación de DQO</b>	-
<b>Eliminación de N-NH4</b>	-
<b>Consumo de alcalinidad</b>	-

#### **4. Análisis estadístico**

Los datos obtenidos de los dos años muestreados (2017 y 2018) primero se han estudiado de forma conjunta para tener una visión general de características de las aguas residuales y rendimiento del proceso. Después **se han clasificado y estudiado por estaciones o periodos estacionales dentro del ciclo anual, 4 estación para cada año, para poder comparar resultados en los distintos periodos estacionales.**

- Estación 1 (E1) empieza en 1 de enero de 2017 y termina en 31 de marzo,
- Estación 2 (E2) empieza en 1 de abril y así respectivamente hasta terminar con estación 4 en 31 de diciembre de 2017 y utilizando mismo principio otras 4 estaciones para 2018.

Los datos recogidos se introducían en un fichero Excel para su almacenamiento y manejo.

**El análisis estadístico se ha realizado principalmente utilizando el programa estadístico Minitab.**

Con los procedimientos propios de la estadística descriptiva se realizarán resúmenes numéricos y resúmenes gráficos de los datos obtenidos, y se investigarán relaciones entre parámetros, así como posibles causas para las desviaciones del comportamiento esperado de la depuradora.

El análisis de datos nos ha de facilitar la comprensión del funcionamiento y evolución de la depuración biológica de la planta de tratamiento, así como la detección de posibles fenómenos o desviaciones para corregir o controlar.

Las comparaciones entre dos grupos correspondientes a los datos de variables de entrada y de salida se realizará con el test estadístico T de Student. Primeramente, se analizarán de manera global los datos para caracterizar en líneas generales el estado de la depuradora y su comportamiento. Seguidamente se pasará a un análisis más detallado con los datos por estaciones según los años, obteniendo un total de 8 grupos para comparar (E1, E2, E3 i E4 para 2017 y los correspondientes para el año 2018).

Las comparaciones o separación de medias se llevarán a cabo con el método del análisis de la variancia (ANOVA), previo control de la homogeneidad de variancias. En el caso de no poder asumir variancias iguales (requisito de la ANOVA), se llevará a cabo el test Welch-ANOVA que no requiere de esta suposición previa de homogeneidad de variancias entre grupos a comparar. La separación de medias se realizará en el caso que sea pertinente con el método estadístico Games-Howell. El nivel de significación para la inferencia estadística se fija al 5%.

## Resultados y Discusión

Primeramente, se analizarán los dos años conjuntamente para tener una idea general del estado y funcionamiento de la depuradora de Ecoparc de Barcelona, a continuación, se presentan los datos por estaciones del año para intentar detectar posibles anomalías en funcionamiento del sistema de depuración biológica de Ecoparc de Barcelona.

Para dar un formato uniforme al estudio los parámetros se analizarán con el siguiente orden respectivamente:

**pH, Conductividad. Alcalinidad, DQO, DBO, N-NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.**

### 1. Análisis conjunto de los datos de los dos años

#### 1.1. pH

El pH es una unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución por lo que es un parámetro muy importante en caracterización de aguas residuales.

En la tabla 6 se representan resúmenes numéricos globales de los valores obtenidos de pH del agua residual a la entrada de la depuradora y a la salida. Vemos que las medias de la entrada y la salida son muy similares, así como sus mínimos, máximos y mediana. Las medias muestran un valor ligeramente básico y con un CV bajo.

**Tabla 6: Estadísticas descriptivas del parámetro pH; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

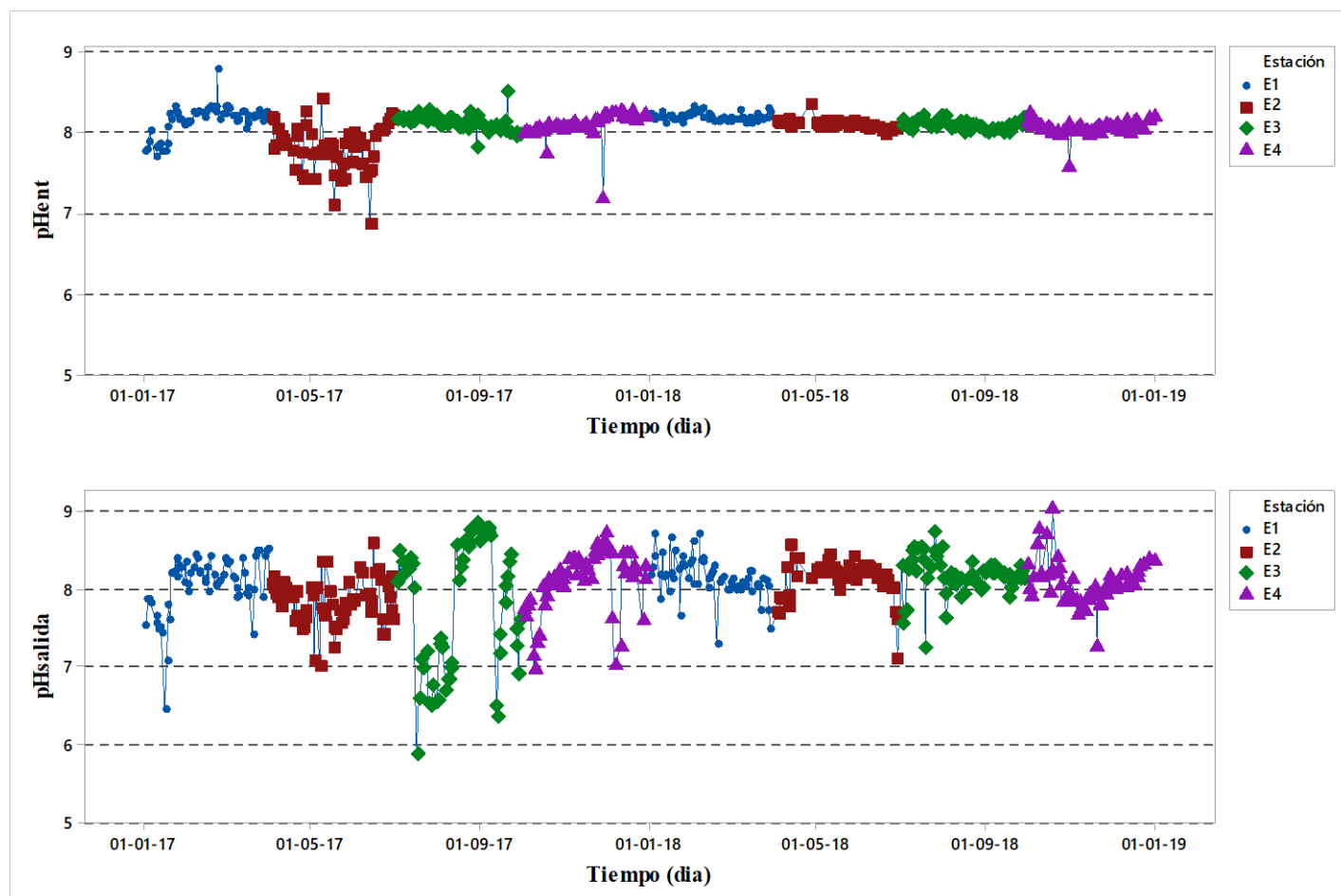
Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Mediana
pH entrada	484	8,1	0,1811	2,24	6,86	8,79	8,03	8,18	8,10
pH salida	484	8,0	0,4434	5,53	5,87	9,02	7,87	8,28	8,12

Como hemos visto en el capítulo anterior la nitrificación es un proceso que acidifica el sistema provocando consumo de alcalinidad y por tanto bajando el pH.

El valor bajo de pH indica la acidez del sistema, observándolo se puede anticipar a tener problemas en la actividad biológica. Si se actúa de manera correcta y a tiempo se puede evitar inhibiciones por acidez o por el pH alto.

La tabla 6 muestra niveles de pH en la salida con valores de **5,87** y **9,02** que pueden ocasionar problemas en el sistema de depuración. Los dos extremos son peligrosos y al mantenerlos se puede provocar inhibición biológica y la muerte de las bacterias provocando inhabilitación de la planta de depuración.

La Figura 5 muestra la evolución temporal del pH de las aguas de entrada y de salida durante el periodo en que se realizó el muestreo. Se observa que el pH de la salida tiene una mayor variabilidad que la entrada que se mantiene alrededor de valor 8. Puntualmente en todas las estaciones y más acentuadamente en la E3-17 se observan pH de salida inferiores a 7,2 que comprometen el proceso de nitrificación.



**Fig. 5** Evolución temporal de pH de entrada y salida de la planta

## 1.2. Conductividad

La conductividad es un parámetro con el que se obtiene información sobre la cantidad de iones que puede tener una solución. Concretamente sirve para medir la capacidad de transmisión de calor, sonido o electricidad y se mide en S/m en unidades de sistema internacional. Aquí se mide la capacidad de transmisión de electricidad.

En la tabla 7 se representa valores de estadística descriptiva de la conductividad a la entrada y a la salida de la depuradora. Como se ve las medias son bastante diferentes entre sí.

**Tabla 7: Estadísticas descriptivas de conductividad de entrada y salida; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Mediana
Conductividad entrada (mS/cm)	485	24,82	3,94	15,87	4,62	33,3	22,8	27,4	25,50
Conductividad salida (mS/cm)	485	11,6	1,77	15,29	4,97	28,6	10,61	12,43	11,44



En la figura 6 vemos una variabilidad diferente para cada muestra. El agua depurada tiene menor variabilidad de que el agua a depurar o agua residual.

En la prueba *T de student* de dos muestras para comparar las medias de las dos aguas, tratada y sin tratar, y como resultado tenemos un p-valor inferior a 0,05, lo que nos permite concluir que las dos medias son significativamente diferentes una de la otra.

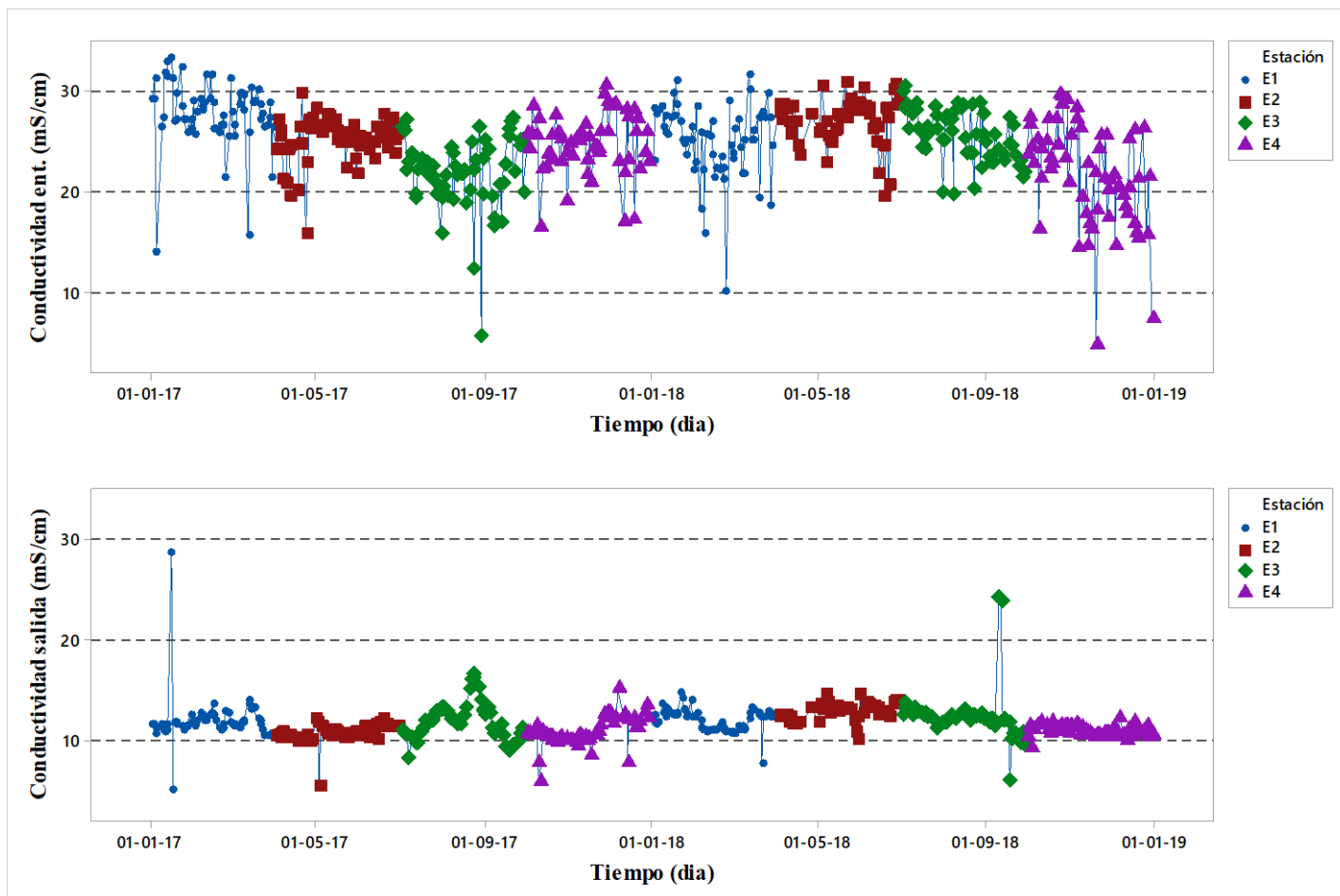
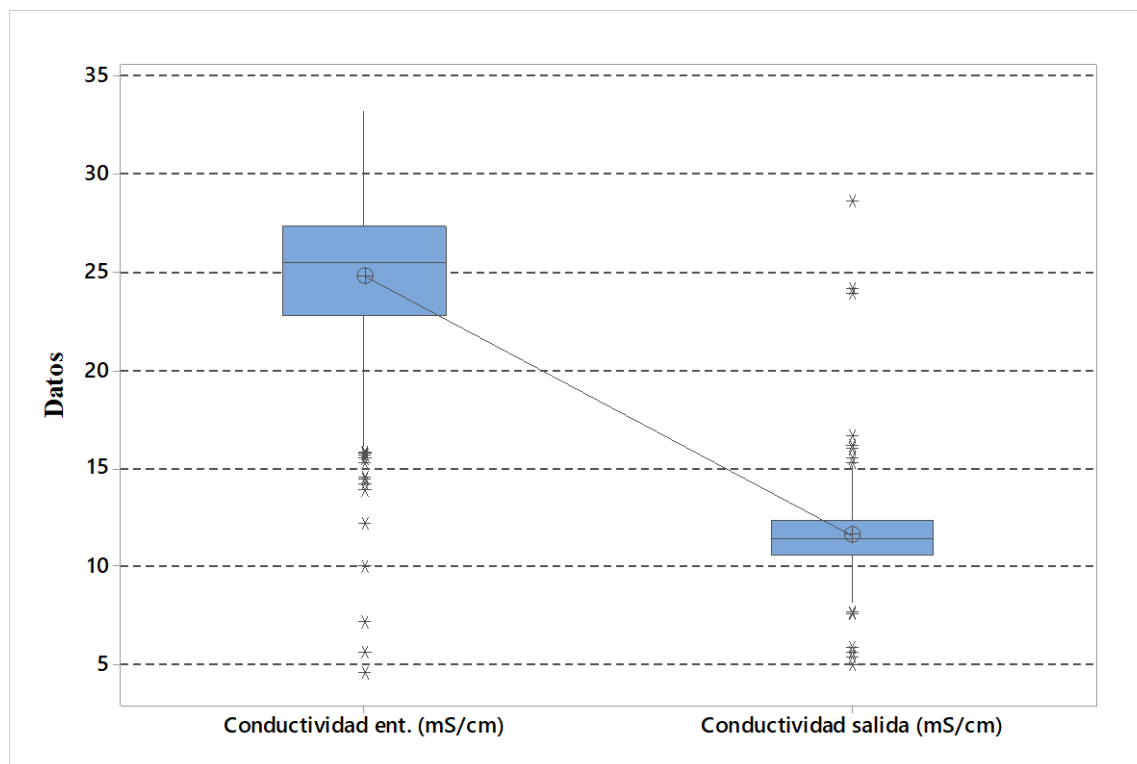


Fig. 6 Evolución temporal de la conductividad a la entrada y salida de la depuradora

Esta diferencia (fig. 7) es muy importante ya que nos indica que durante la depuración se pierde la conductividad de agua. Quiere decir que a la entrada hay mayor cantidad de partículas polares y iones que van transformando durante la depuración biológica formando parte de bacterias o transformando en moléculas apolares y en gas.

Es un indicador que la depuración funciona y por ejemplo  $\text{NH}_4^+$  se acaba transformando en nitrógeno gas.



**Fig. 7 Diagramas de cajas para los valores obtenidos de conductividad en la entada y salida de la depuradora de los dos años**

### 1.3. Alcalinidad

La alcalinidad es uno de los parámetros que se deben tener en cuenta cuando se desea un control adecuado y un funcionamiento óptimo de un proceso NDN. El equilibrio dióxido de carbono-bicarbonato es el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad en el rango de pH de 6 a 8 mediante la capacidad tampón del medio.

El control de alcalinidad es necesario para determinar que el agua residual tiene suficiente capacidad tampón para controlar el pH y evitar cambios bruscos del mismo así da margen de actuación se requiere intervenir.

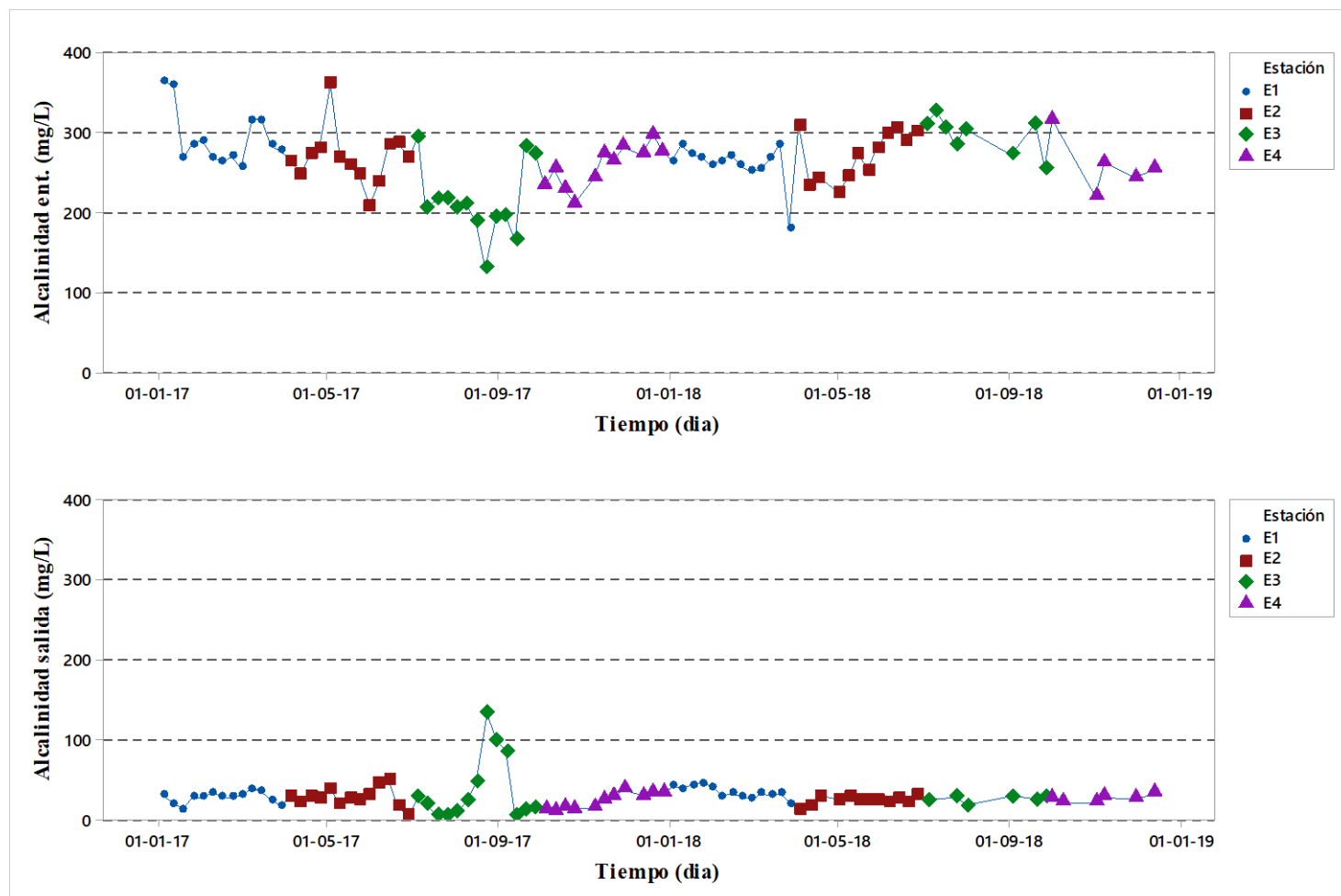
En la tabla 8 se representa datos de estadística descriptiva para poder observar en que valores se encuentra el agua residual.

**Tabla 8: Valores de estadística descriptiva de la alcalinidad a la entrada y salida de la depuradora; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Mediana
Alcalinidad entrada (mg/L)	88	264,42	40,77	15,42	130,0	365,6	244,5	285,8	269,0
Alcalinidad salida (mg/L)	87	28,02	18,01	64,27	3,8	133,0	18,8	31,6	27,0

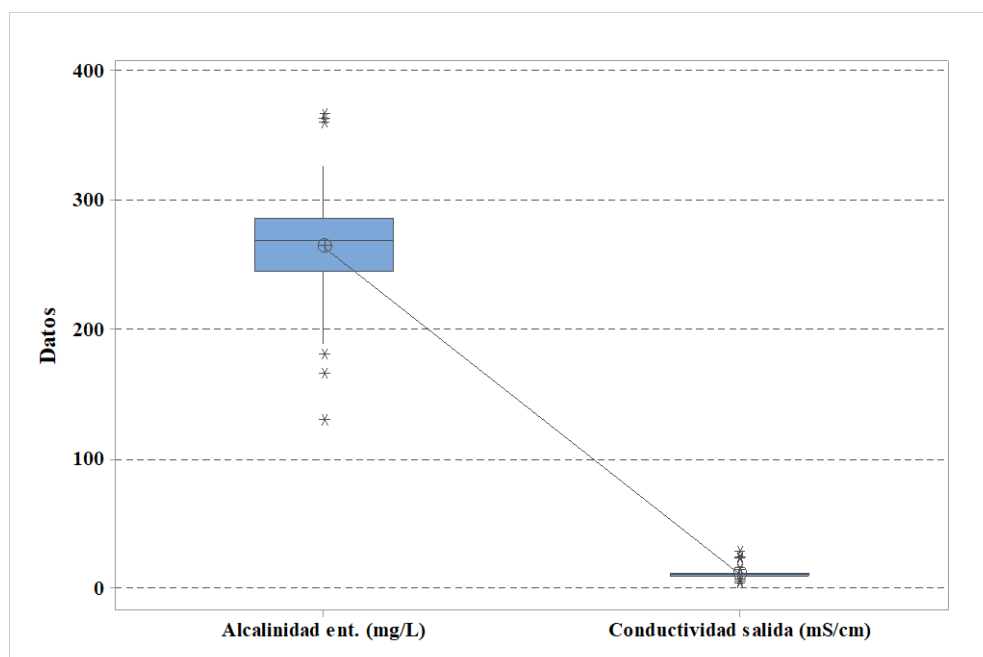
Haremos una representación gráfica de evolución temporal del parámetro para visualizar su comportamiento a lo largo de tiempo en la figura 8.

Se observa que alcalinidad a la salida de la depuradora no supera a un máximo de 100mg/L como también se ve en la tabla 6. Mientras que a la entrada de la depuradora el valor de alcalinidad ronda alrededor de 250 mg/L. Esto indica directamente que la alcalinidad se consume durante la depuración biológica y a su vez esto se traduce en menor capacidad tampón de agua. Sabemos efectivamente que la nitrificación consume alcalinidad y si el agua residual no tiene suficiente capacidad tampón provoca depresión del pH y esto disminuye proceso de nitrificación. Por este motivo es importante controlar alcalinidad y corregirlo si hace falta.



**Fig. 9 Evolución temporal de alcalinidad a la salida y entrada de la depuradora**

Por la tabla y la gráfica es evidente que las medias de la entrada y salida son diferentes, pero representaremos la gráfica de cajas para reafirmarlo.



**Fig. 8 Diagramas de cajas para los valores obtenidos de alcalinidad y conductividad en la entada y salida de la depuradora respectivamente de los dos años**

#### 1.4. DQO, demanda química de oxígeno

Para el diseño de cualquier depuradora, su siguiente funcionamiento y observación de ella se necesita conocer la demanda química de oxígeno. Es el parametro más utilizado para caracterización de agua residual. Utilizar unidades DQO para expresar las concentraciones de los compuestos orgánicos presenta grandes ventajas para cerrar los balances de materia. Mide cantidad de materia oxidable que hay en una muestra. Concretamente es la demanda de oxígeno equivalente al dicromato de potasio consumido al oxidar en el ambiente ácido y caliente la materia orgánica de una muestra.

**Fig. 10 Estadísticas descriptivas de la DQO a la entrada y salida de la depuradora; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Mediana
<b>DQO entrada(mg/L)</b>	296	19626	5051	25,74	3300	46000	16375	22775	19200
<b>DQO salida(mg/L)</b>	293	1022,5	345,8	33,82	378,0	2875,0	806,0	1130,5	937,0

En la tabla 11 vemos que la DQO de la entrada y salida **son diferentes**, claro está, **si no fuera así la planta no funcionaria**. Uno de los objetivos de la depuración biológica es eliminar materia degradable química y biológicamente. Representamos una gráfica de dispersión para observar comportamiento a lo largo de tiempo.

En este caso las dos gráficas, DQO entrada y DQO salida, se han representado en escalas diferentes en el eje de ordenadas ya que los valores son muy diferentes y la gráfica de la salida con misma escala que utilizada en la gráfica de entrada no permite visualizar correctamente la evolución de esta variable.

Se observa en la figura 11 que la variabilidad de la DQO entrada es menor que la salida y así lo confirma coeficiente de variación.

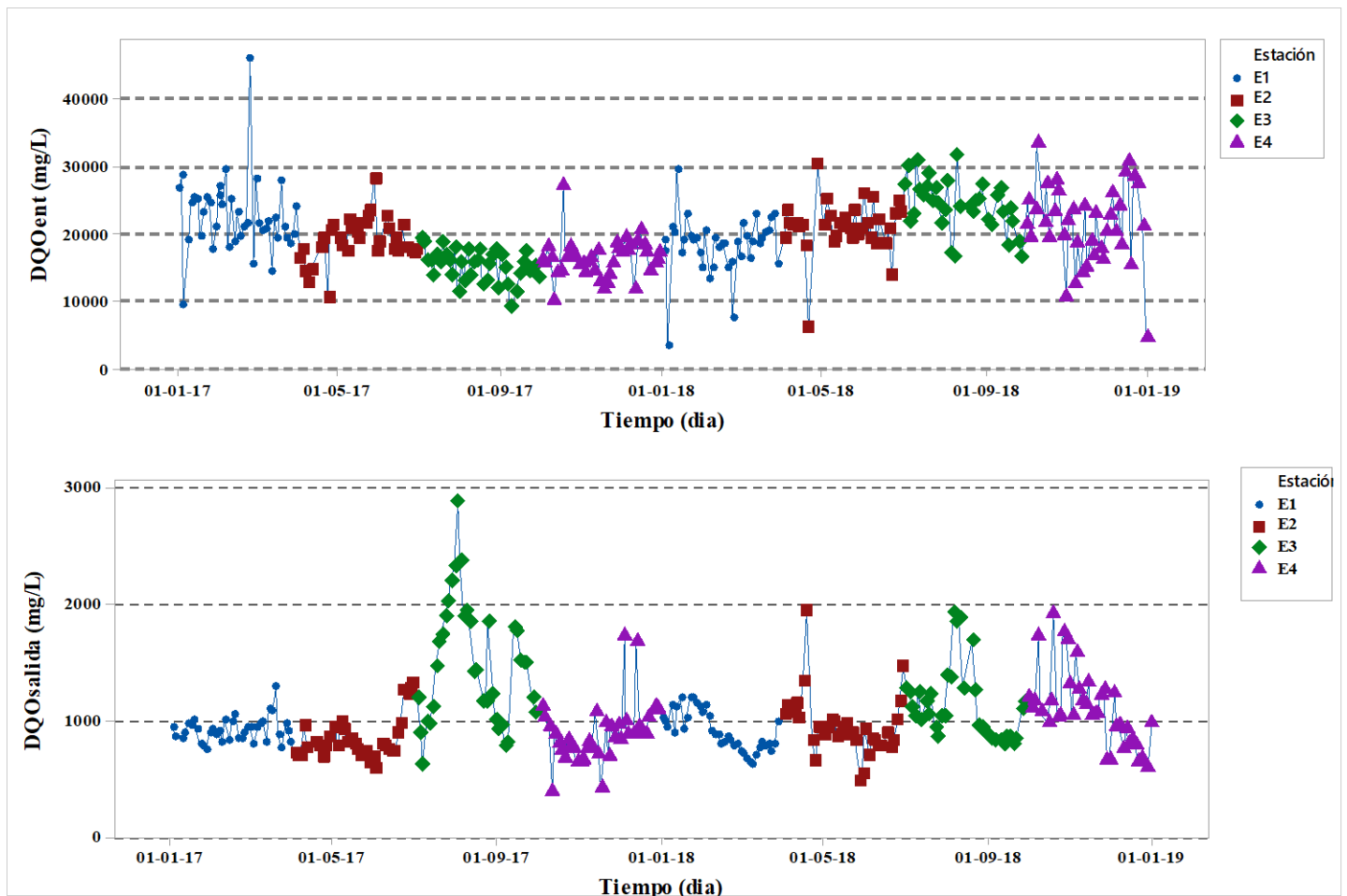
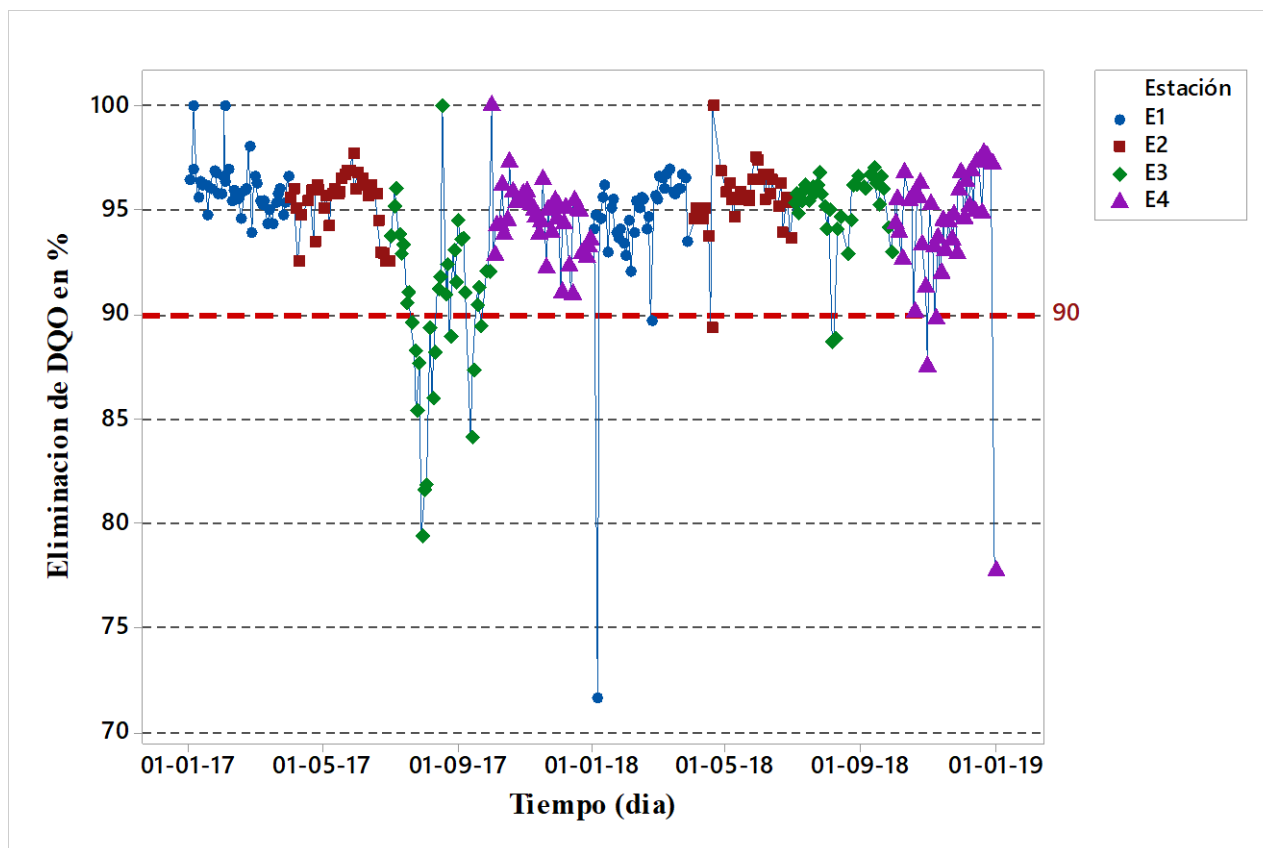


Fig. 11 Evolución temporal de la DQO a la entrada y salida de la depuradora

La eliminación media es del 94,4 y el 95,2 para los años 2017 y 2018 respectivamente. En el 91% de los muestreos se ha obtenido una DQO de salida inferior a 1500 mg/L, por lo tanto, apta para ser vertida. Si decidimos que una eliminación de la DQO mayor a 90% como límite (la que más se acerca a 1.500 mg/L límite de vertido), entonces obtenemos en conjunto de dos años **97,3% de veces se ha conseguido cumplir el objetivo.**

Debido a la importancia del parámetro se ha realizado una gráfica de dispersión (fig. 12) donde se apreciará con detalle la eliminación de la DQO.

En el eje de ordenadas de la figura 12 se representa el porcentaje de la DQO eliminada y en el eje de abscisas el tiempo en días. Con la línea roja sobre valor porcentaje de la DQO en 90% se muestra la referencia tomada para aceptar el valor como adecuado.



**Fig. 12 Evolución de la eliminación de la DQO en el tiempo**

Aquí vemos que en la mayoría de las veces la eliminación de DQO ha sido exitosa. No obstante, se observa un descenso en la eficiencia en la estación 3 del año 2017 donde solamente un 67% de los casos la DQO de salida cumple con los límites de vertido.

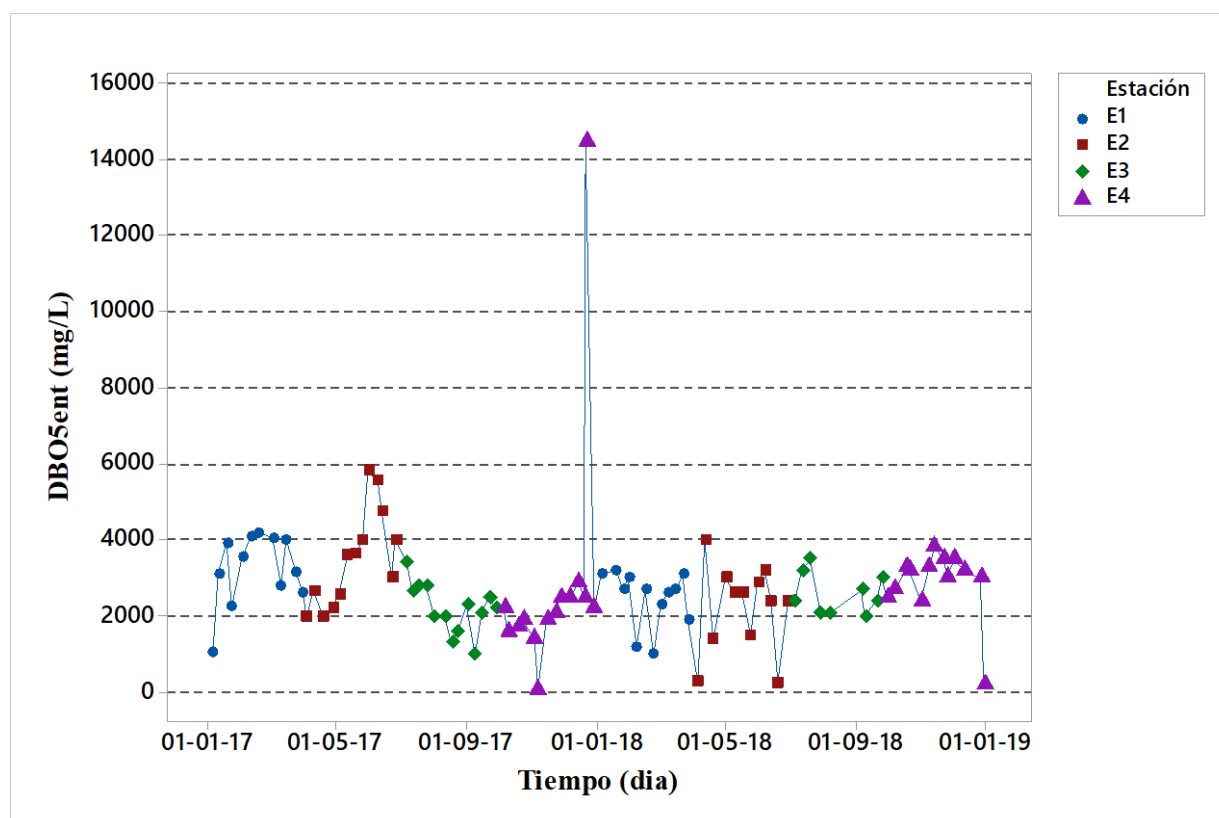
### 1.5. DBO, demanda bioquímica de oxígeno

La DBO mide materia orgánica biodegradable presente en agua residual. Su definición es: la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en  $\text{mgO}_2/\text{L}$  de agua residual. El análisis se realiza a  $20^\circ\text{C}$  durante 5 días de manera estándar, denominándose  $\text{DBO}_5$ . Para un resultado más exacto de la cantidad de materia orgánica biodegradable se amplía a 21 días denominando así la prueba  $\text{DBO}_{21}$ .

En nuestro caso las analíticas de la DBO se hicieron solamente a la entrada de la depuradora por lo que no será posible comparar entrada y salida de agua residual.

**Tabla 9: Estadísticas descriptivas de la  $\text{DBO}_5$  del agua residual; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Mediana
<b><math>\text{DBO}_5</math> entrada (mg/L)</b>	98	2757	1565	56,75	80	14450	2100	3200	2645



**Fig. 13 Evolución temporal de la  $\text{DBO}_5$  del agua residual a la entrada de la depuradora**



En la tabla 9 vemos que el número de datos recogidos son menores que los que se han recogido para otros parámetros, es una metodología complicada y larga que parece que tiene un menor interés por parte de la empresa. Tenemos una media de 2757 mg/L de DBO<sub>5</sub>. Con el Q1 y Q3 se observa que normalmente movemos alrededor de la media obtenida. Si hacemos gráfica de evolución se confirma visualmente también que casi siempre los valores habituales están entre primer y tercer cuartil.

Con la gráfica de evolución temporal (fig. 13) se confirma que el rango de los valores obtenidos es de 2.000 y 4.000 mg/L de DBO. Podemos calcular biodegradabilidad del agua utilizando valores de DBO<sub>5</sub> y DQO.

La biodegradabilidad de agua residual se puede estimar con la fracción de DBO<sub>5</sub>/DQO. En este caso se obtiene un valor medio de **0,14** lo que indica que materia orgánica del agua residual es poco biodegradable ya que presenta un valor menor de 0,2. Por lo tanto, será conveniente utilizar un tiempo de retención hidráulico elevado para conseguir la degradación deseada.

### 1.6. N-NH<sub>4</sub>, nitrógeno amoniacal

El amonio es el principal contaminante de nuestra agua residual después de la DQO. Sus valores llegan a unos máximos muy preocupantes a la entrada de la depuradora. En la Tabla 10 se representa valores estadísticos del parámetro a la entrada y salida de la depuradora. Como se observa la eliminación es alta, no obstante, en cuanto a la salida, la media supera el doble el límite de vertido (60 mg/N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L) pero la mediana es inferior.

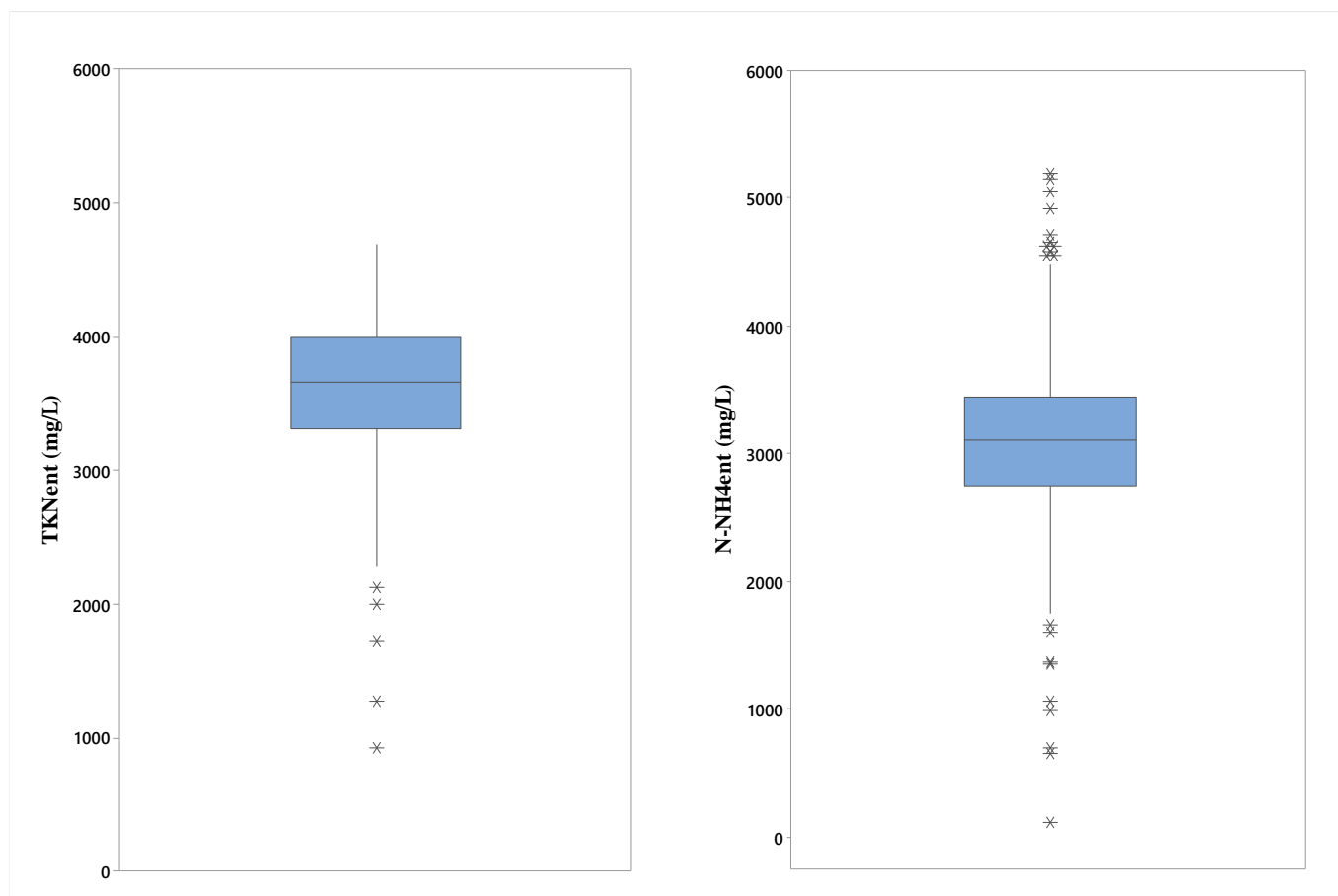
**Tabla 10: Estadísticas de descriptivas de N-NH<sub>4</sub> a la salida y entrada de la depuradora; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Mediana
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Entrada (mg/L)</b>	486	3128,7	653,6	20,89	109,0	5200,0	2750,0	3452,5	3112,5
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> salida (mg/L)</b>	487	121,0	231,0	190,98	0,0	1600,0	6,0	148,0	40,0

Se observa una dispersión mucho más elevada en la salida que en la entrada, ello junto a la media obtenida indica que hay dificultades en conseguir la eficiencia del sistema necesaria.

Si medimos nitrógeno total **Kjeldahl** (TKN), esto es, nitrógeno orgánico más lo que está en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> obtenemos un valor medio 3.562,2 mg/L algo muy similar a N-NH<sub>4</sub> 3128,7 mg/L. Indica que casi todo el nitrógeno que contiene el AR está en forma de amonio.

Si comparamos los dos diagramas (fig. 14) de cajas correspondientes a TKN y N-NH<sub>4</sub> se observa que las medias de los dos parámetros (3.562,2 i 3128,7 mg N/L respectivamente) son muy similares confirmando que **todo el nitrógeno está en forma de nitrógeno amoniacal**. El diagrama de dispersión de estas dos variables muestra una correlación lineal significativa (p-valor = 0,002). El valor del coeficiente de correlación de Pearson para TKN i N-NH<sub>4</sub> es 0,69. Esto confirma que efectivamente están relacionados.



**Fig. 14** Diagramas de cajas para los valores obtenidos de nitrógeno amoniacal y TKN en la entada de la depuradora unificando los datos

Como vemos en la Figura 15 hay alguna estación en la que los valores de  $\text{N-NH}_4^+$  salida son más altos de lo habitual y tenemos otros momentos que se supera el objetivo establecido.

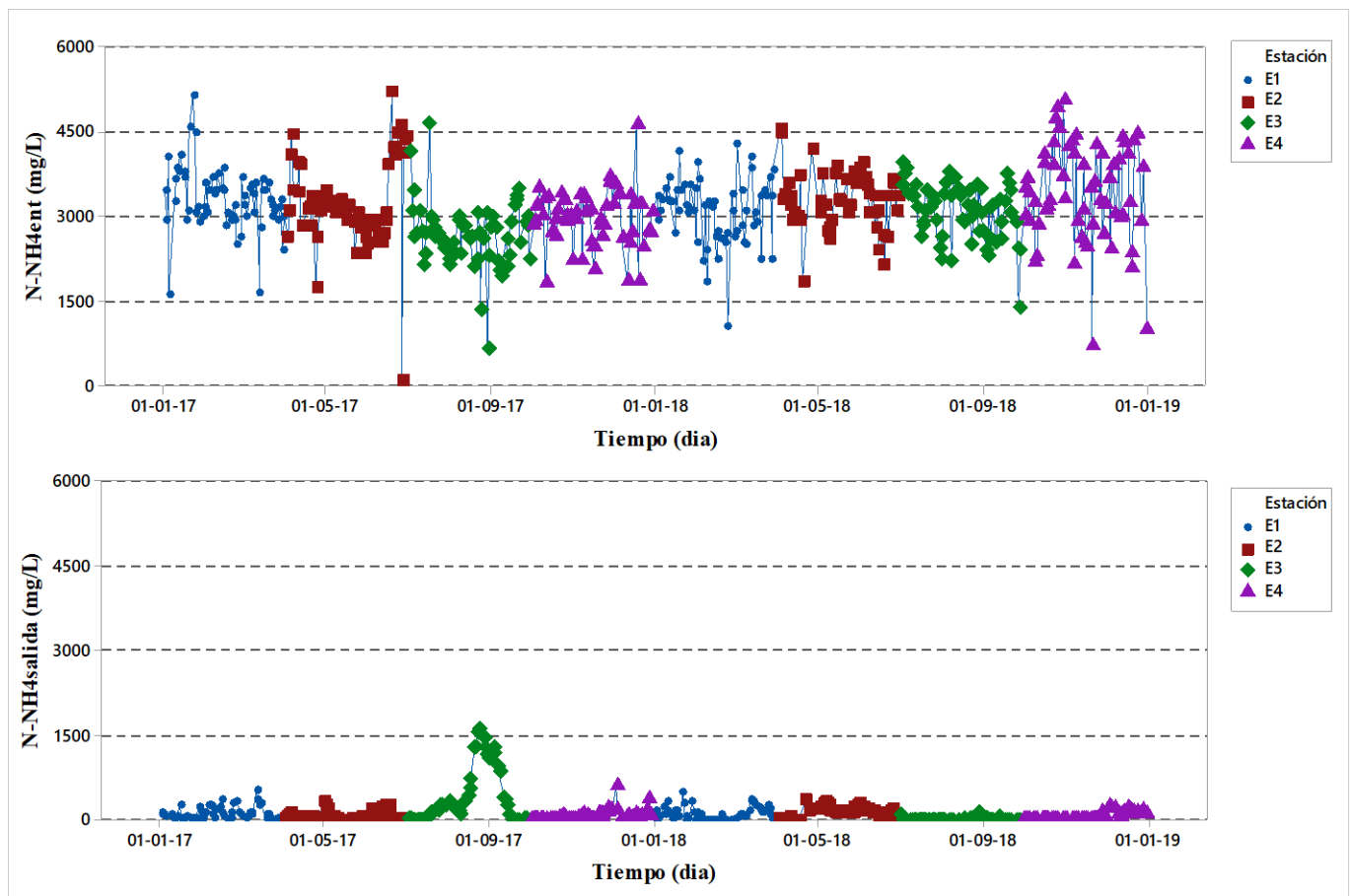
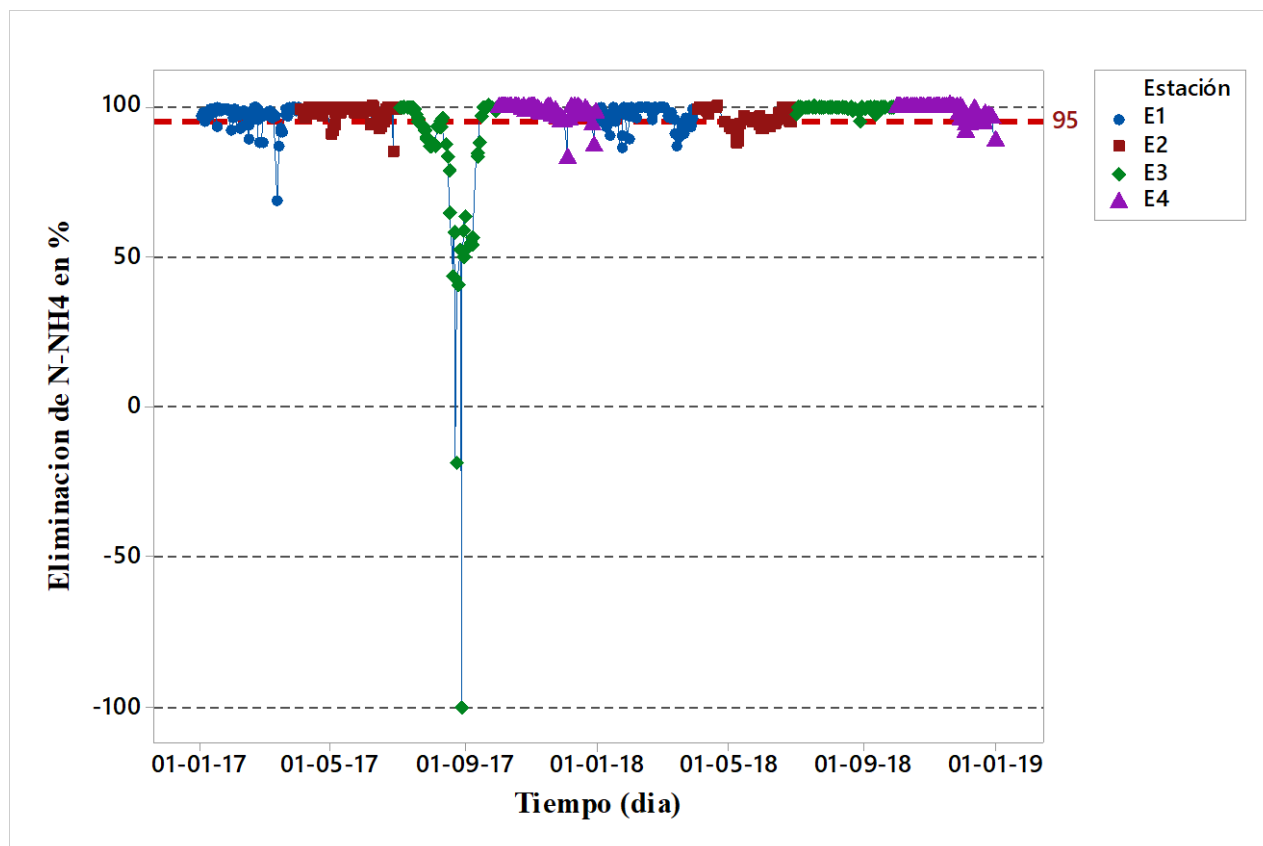


Fig. 15 Evolución temporal de  $\text{N-NH}_4$  a la entrada y salida de la depuradora

Representaremos en la gráfica 18 la evolución temporal del porcentaje de eliminación de nitrógeno amoniacal. El porcentaje de eliminación media ha sido de 94,5 % y un 97,7 % para 2017 y 2018 respectivamente. Si fijamos un porcentaje de eliminación elevada como por ejemplo superior al **95%** entonces en el conjunto de los dos años podemos afirmar que **78,2% de veces se ha cumplido objetivo**. No obstante, solamente en el 53% de los casos el valor de amonio de salida es inferior a 60 mg/L establecido por autoridades. **No hemos de olvidar que después vendrá unas osmosis inversas que asegurará los límites de vertido.**

En la figura 16 se observa que hay desviaciones en el sistema y la salida de E3-17 es la que más se desvía. Como vemos el sistema no siempre funciona bien, un 78,2 % se debe mejorar. Grandes concentraciones de nitrógeno amoniacal en el sistema pueden inhibir actividad bacteriana, aumentar pH y desequilibrar todo el sistema.



**Fig. 16 Evolución temporal de eliminación de nitrógeno amoniacal**

## 1.7. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Nitratos

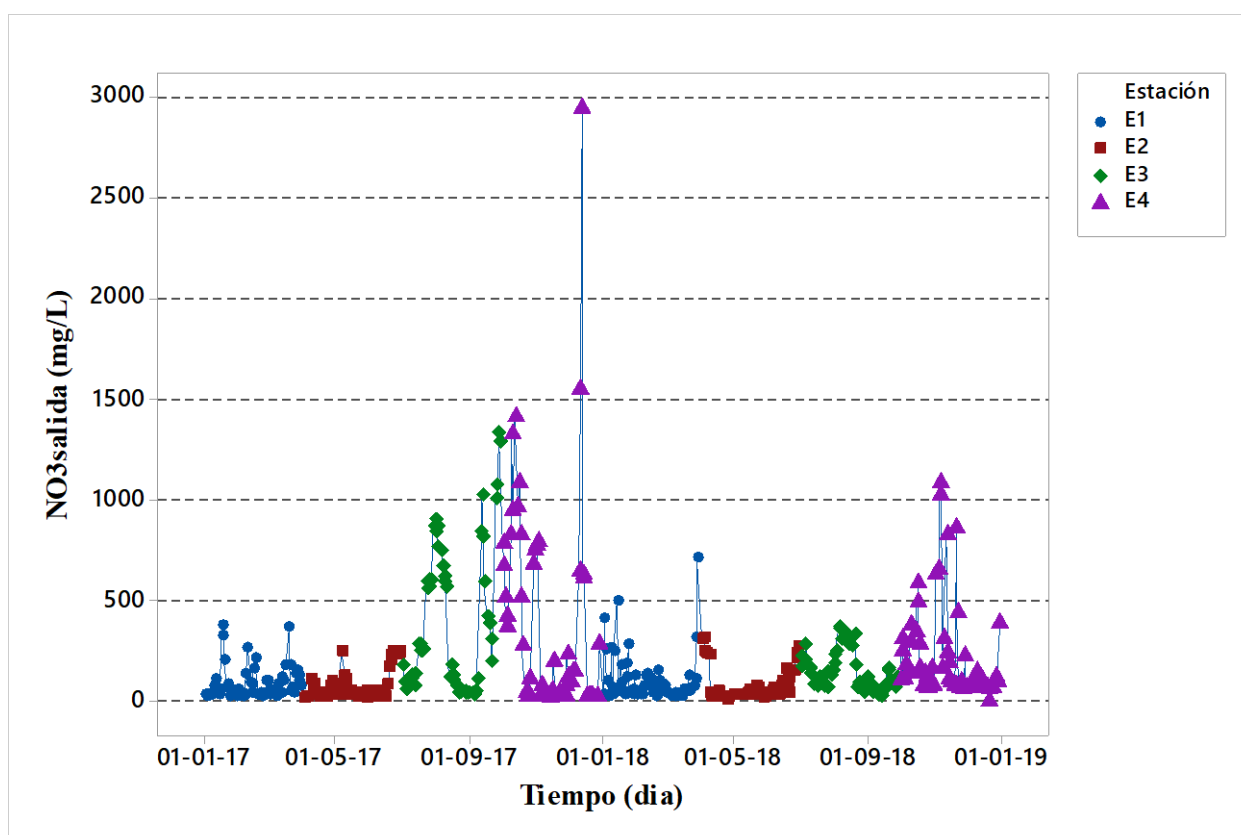
La concentración de nitratos es uno de los parámetros más importantes de nuestra agua residual. Es controlado por autoridades y es un buen indicador de la evolución del sistema. En la tabla 11 mostramos datos estadísticos de concentración de los nitratos a la salida de agua residual. A la entrada no se toma estos datos porque es prácticamente nulo.

**Tabla 11: Tabla de los datos estadísticos de la concentración de nitratos; Q1: Primer cuartil o percentil 25; Q3: tercer cuartil o percentil 75**

Variable	Tamaño muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación (%)	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> salida (mg/L)	485	184,3	77,6	278,7	151,26	0,9	2940,0	35,8	205,4

**Recordemos aquí que el objetivo respecto a los nitratos es bajar la concentración a 100 mg/L.** Sabiendo esto vemos que la media es más bien alta y valor máximo 2940 mg/L es muy alto lo indica desajustes importantes del sistema.

En la gráfica de dispersión, figura 17, se representa mejor la evolución temporal del parámetro.



**Fig. 17 Evolución temporal de concentración de nitratos a la salida de la depuradora**

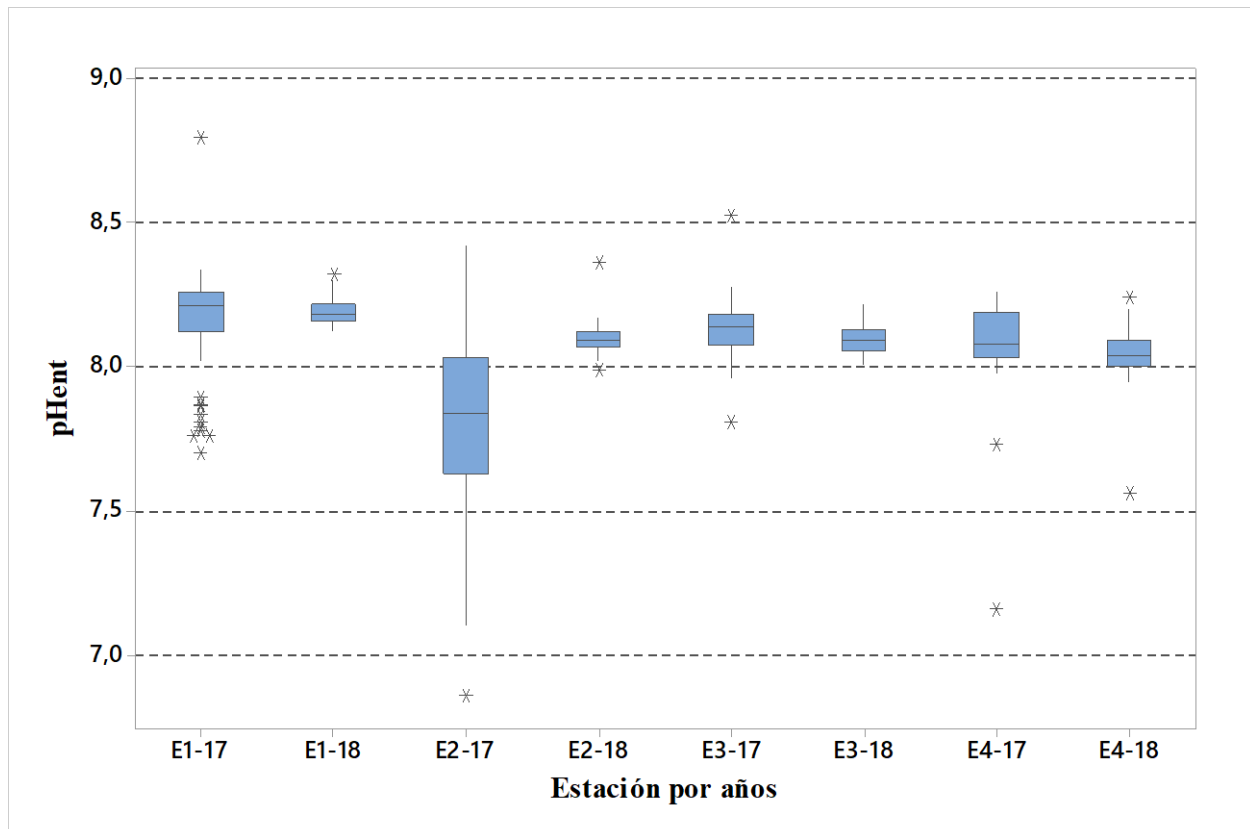
Si calculamos porcentaje de veces que se habría cumplido el objetivo obtenemos un **58,1%**. Es un valor muy bajo que se debe tener en cuenta y mejorar. Por supuesto antes del vertido de agua como hemos mencionado en capítulo anterior tenemos la **osmosis inversa que baja la concentración a mínimos** y lo convierte en agua apta para el vertido.

## 2. Análisis de los datos por estaciones

En este capítulo analizaremos los parámetros previamente seleccionados por estaciones, intentaremos encontrar similitudes y diferencias según estaciones para comprobar si temperatura de ambiente provoca el desequilibrio o si la evolución tiene algún patrón. En este apartado no analizaremos la DBO<sub>5</sub> porque los datos para cada estación son muy reducidos en número (menores de 20). No tendría sentido estadístico y las conclusiones serían poco fiables.

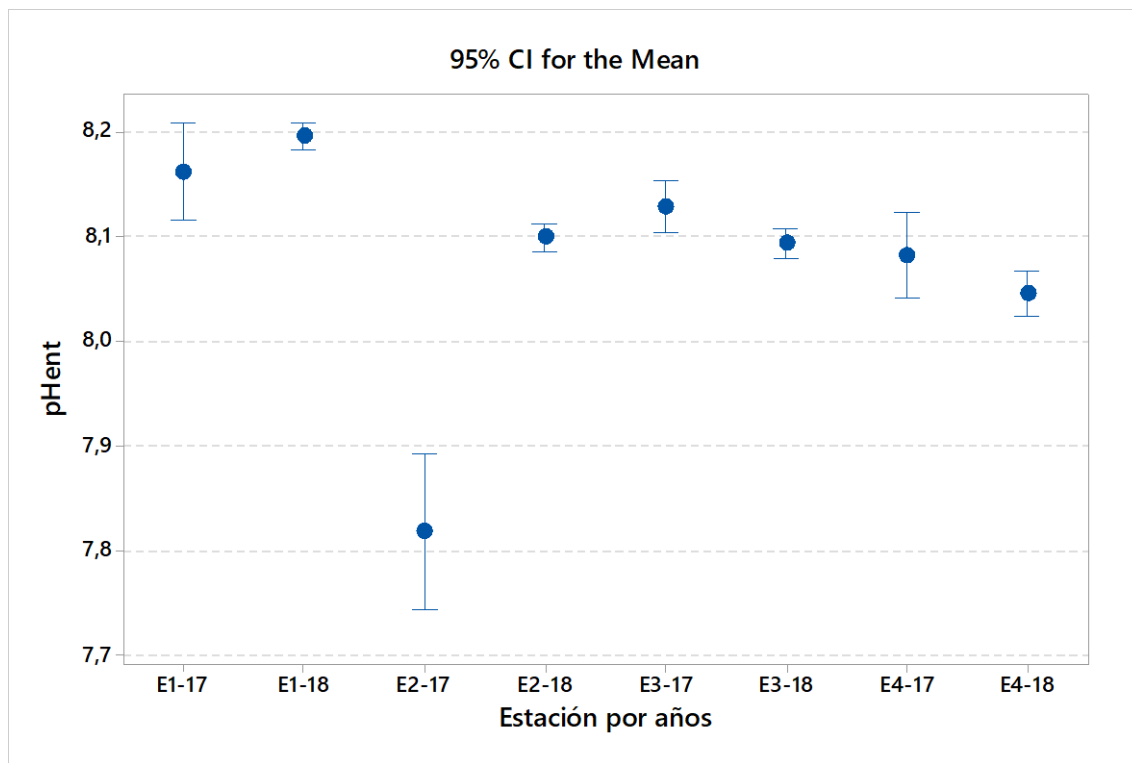
### 2.1 pH

Presentando caja de graficas (fig. 18) de pH de la entrada de agua residual podríamos deducir que aproximadamente los valores han sido similares durante el periodo de observación. Como se aprecia bien, estación 2 de 2017 ha tenido mayor variabilidad o desviación de la tendencia central.



**Fig. 18 Diagramas de cajas para los valores obtenidos de pH en la entada de la depuradora correspondientes a estación y año**

Para mejorar la visibilidad del hecho y asegurar fiabilidad del resultado hacemos una gráfica de caja de las medias con las varianzas propias de cada una ya que con la prueba de varianzas obtenemos que son diferentes. Esto se realiza haciendo test ANOVA con Matlab.



**Fig. 19 Intervalos de confianza para la media de la variable pH entrada según la estación y el año.**

Pues en la fig. 19 vemos perfectamente que la estación 2 de 2017 es muy diferente del resto de las estaciones de los 2 años. Debemos recordar que las características del agua residual a la entrada de la depuradora no son controladas por los operadores de la planta y depende en gran medida del tipo de residuo urbano que recibe ecoparc o del funcionamiento de los digestores ya que supone principal fuente de alimentación para la planta de depuradora.

El método del análisis de la variancia sin la suposición de igualdad de variancias (las variancias de los distintos grupos resultaron significativamente diferentes) se utilizó para valorar la igualdad o no de las medias correspondientes al pH entrada a los distintos periodos temporales. El valor-p de la prueba que se obtuvo fue menor de 0,05, por lo que se pudo concluir que el pH de la entrada es significativamente diferente entre las estaciones. La separación de medias que proporcionó el método **Games-Howell** se presenta en la tabla 12.

Este método nos ayuda a distinguir y agrupar los datos analizados. Las letras corresponden a un grupo, esto es, los que tienen letras iguales pertenecen al mismo grupo o en otras palabras no hay diferencia significativa entre las medias correspondientes. Por ejemplo, no podemos diferenciar E1-18 y E1-17 porque los dos tienen la letra A y E1-17 a su vez no se distingue de las estaciones que tienen la letra B.

**Tabla 12: Comparación de las medias de pH entrada**

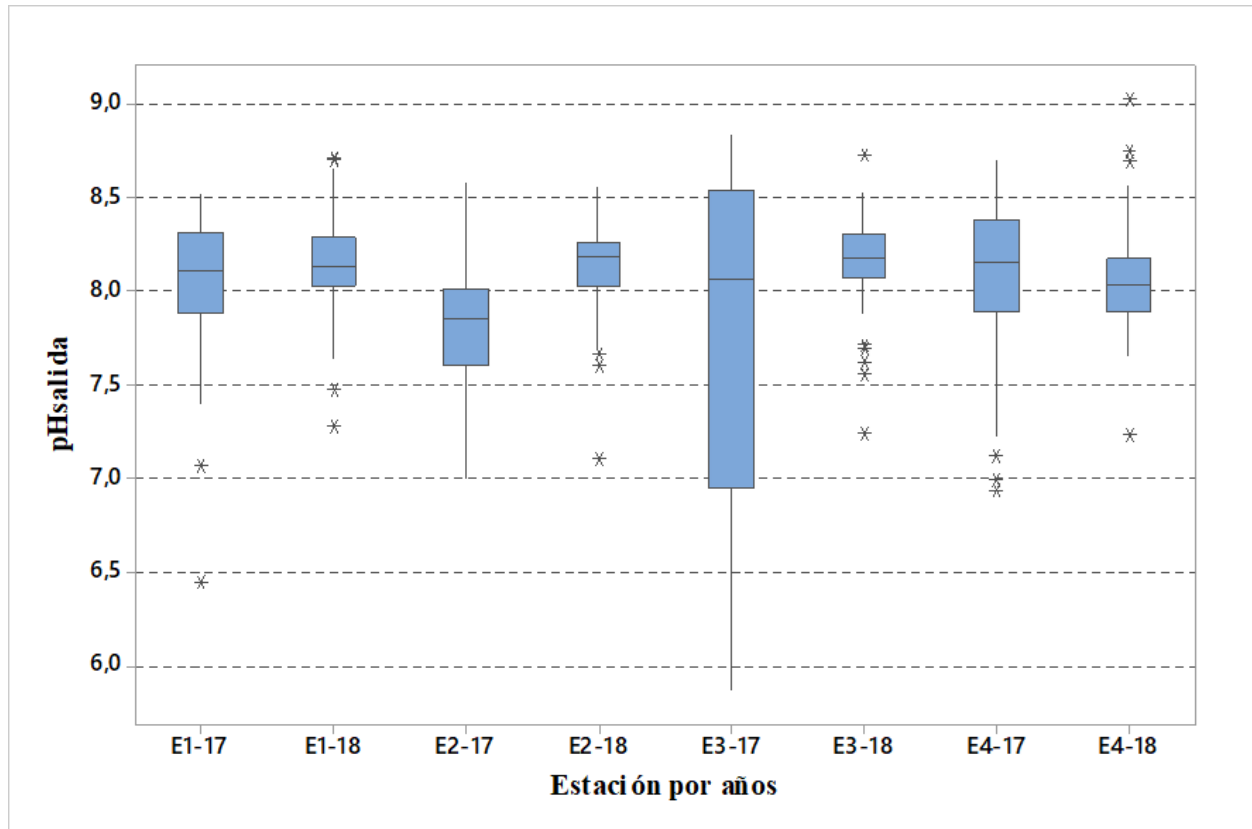
<b>Estación por años</b>	<b>Numero de datos</b>	<b>Media mg/L</b>	<b>Agrupación</b>	
E1-18	63	8,19540	A	
E1-17	63	8,1613	A	B
E3-17	61	8,1277	B	
E2-18	55	8,09873	B	
E3-18	61	8,09328	B	
E4-17	59	8,0817	B	C
E4-18	61	8,0452	C	
E2-17	61	7,8185	D	

Aquí podemos observar que la estación 2 de 2017 es la que se distingue del resto de las estaciones y su media es relativamente baja. 7,8 de pH no es un valor alarmante, pero se debe tener en cuenta y observar el funcionamiento del sistema comprobando que las bacterias consiguen adaptarse.

Ahora intentamos comprobar si el pH de la salida también ha sido alterado en el mismo periodo de tiempo.



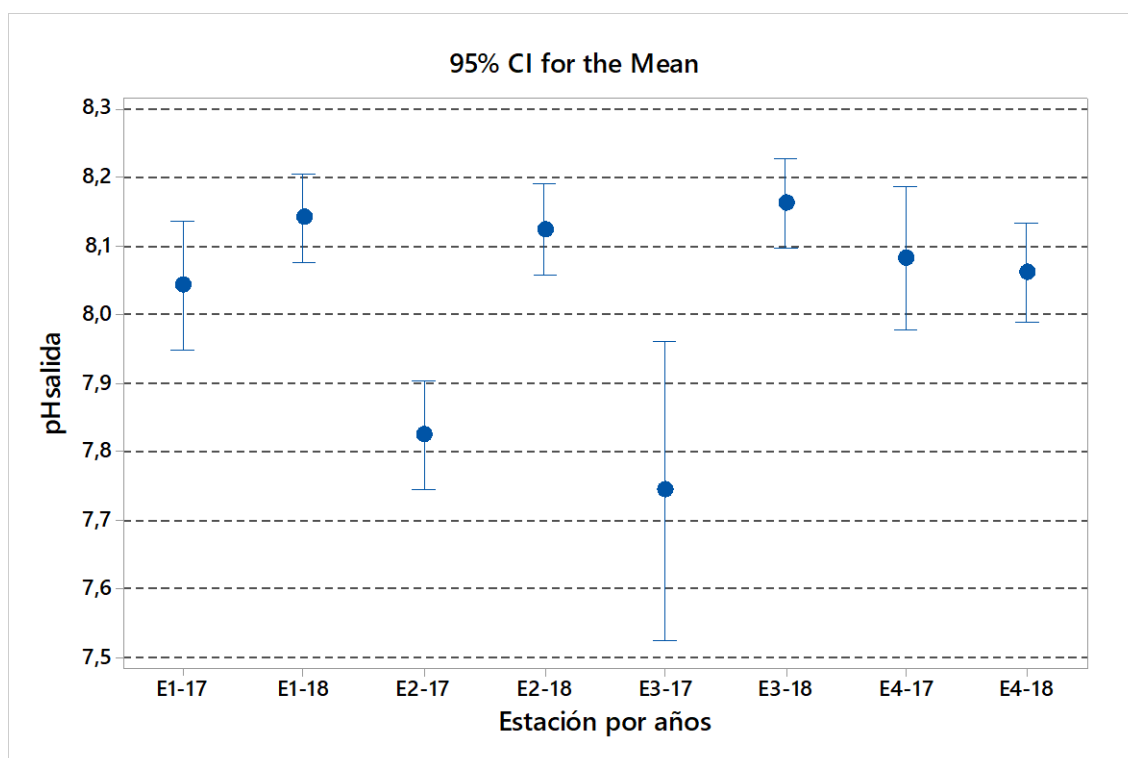
Representado una gráfica de cajas de los valores por estaciones no nos da en este caso mucha información cuesta distinguir y separar unas estaciones de otras. Si miramos la figura 20 solo podríamos decir que no hay diferencias entre estaciones por lo que se refiere al pH de la salida.



**Fig. 20 Diagramas de cajas para los valores obtenidos de pH en la salida de la depuradora correspondientes a estación y año**

Pero si realizamos una gráfica de intervalos de las medias (fig. 21) vemos una imagen bastante distinta. Podemos afirmar que valores de pH de estación 2 de 2017 ha sido bien distinta del resto de las estaciones menos la estación 3 del mismo año, 2017. El valor de la media de pH de la entrada de 2017 ronda a 7,8 y lo mismo a la salida. Podríamos decir que pH de la entrada y salida durante la estación 2 de 2017 no se ha modificado. Podría significar que el efecto tampón de agua residual ha funcionado.

Volviendo a observar figura 20 vemos los valores atípicos con asterisco de cada estación. Algunos de ellos son más problemáticos que otros. Si pH baja de valor 7 indica falta de carbonato o poder tampón del agua. Es importante tomar medidas si el problema persiste y no se recupera pH.



**Fig. 21** Intervalos de confianza para la media de la variable pH salida según la estación y el año

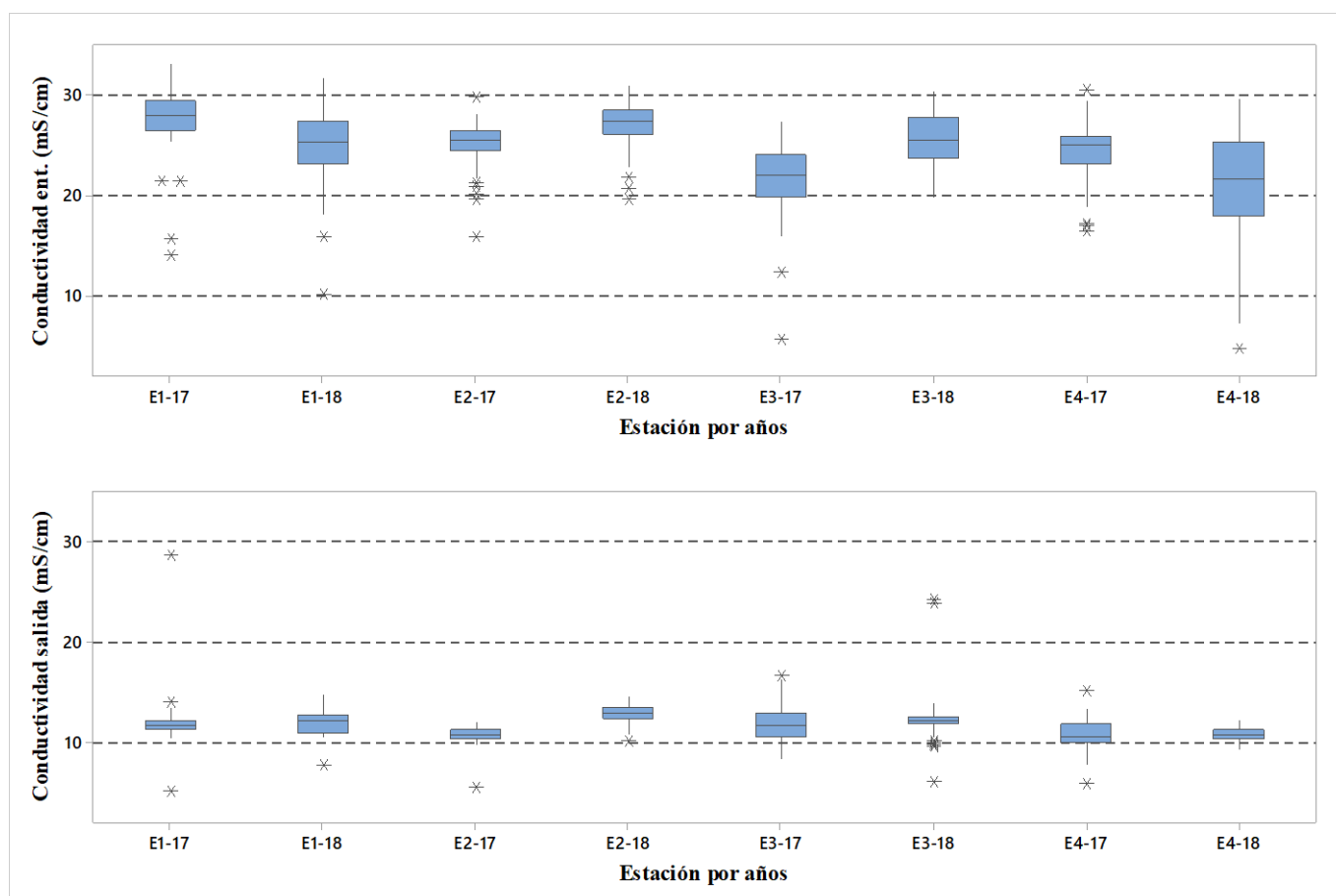
En la figura 23 y en la tabla 13 podemos comparar las estaciones entre sí. No tenemos un claro ejemplo de desviación. E3-17 en la figura 21 podría confundirnos, pero al comprobar en la tabla vemos que pertenece a 2 grupos, los que tienen las letras B y C. Si que tenemos su media más baja de las otras, pero estadísticamente en este caso no podemos separar de otras estaciones.

**Tabla 13:** Comparación de las medias de pH de la salida

Estación por años	Numero de datos	Media mg/L	Agrupación	
E3-18	61	8,1630	A	
E1-18	63	8,1410	A	
E2-18	55	8,1247	A	
E4-17	59	8,0822	A	B
E4-18	60	8,0622	A	B
E1-17	64	8,0423	A	B
E2-17	60	7,8247		C
E3-17	62	7,744	B	C

## 2.2 Conductividad

La figura 22 muestra gráfica de cajas de conductividad a la entrada y salida de la depuradora de los dos años representado por estaciones de cada año. Apparently no hay diferencias respecto las estaciones. Para confirmar o rechazar la hipótesis haremos test ANOVA.



**Fig. 22 Diagramas de cajas para los valores obtenidos de Conductividad en la entrada y salida de la depuradora correspondientes a estación y año**

En las figuras 23 y 24 tenemos comparación de las medias de las estaciones para la entrada y la salida respectivamente. Vemos que hay diferencias entre las estaciones que pueden deber la temperatura local, el contenido o la tipología de agua residual que llega en la depuradora o algún factor externo que se debe estudiar y analizar para prever diferencias e intentar reducir al mínimo la variabilidad entre estaciones.

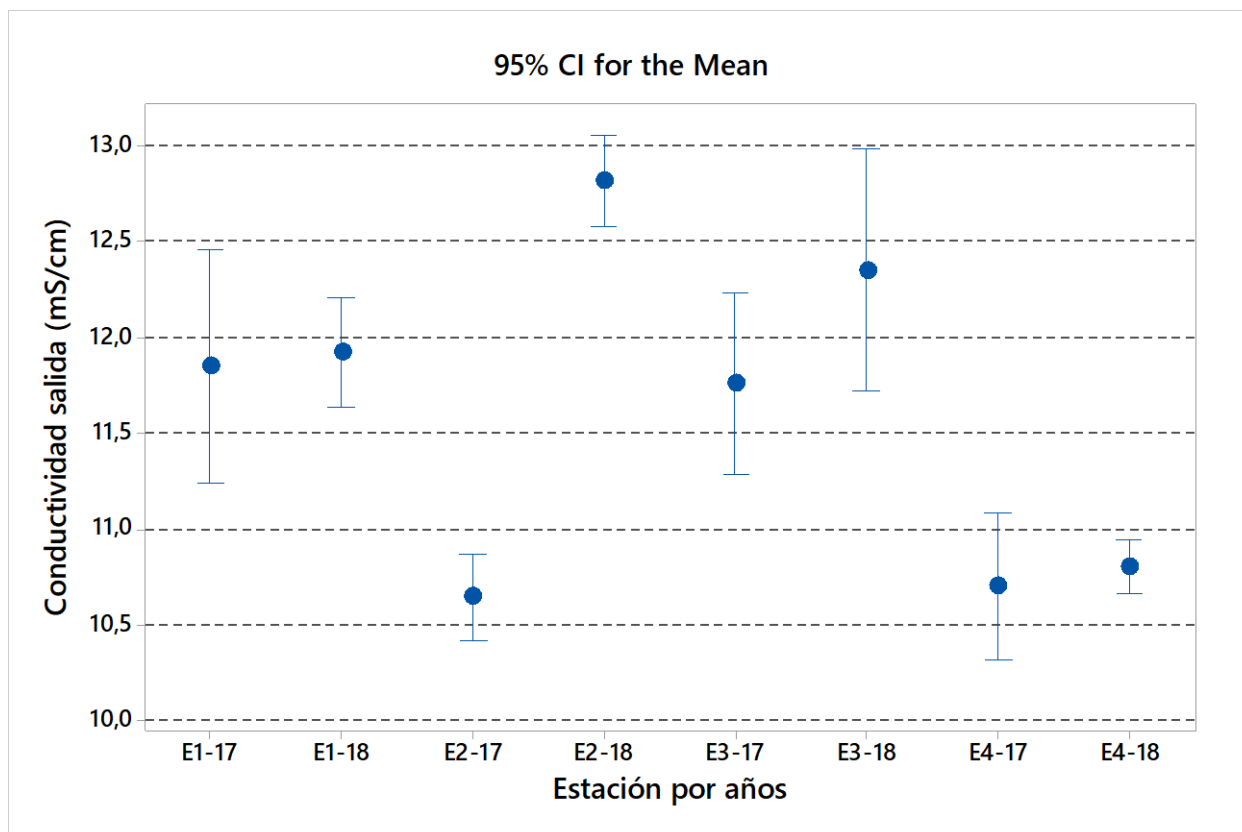


Fig. 23 Intervalos de confianza para la media de la variable Conductividad salida según la estación y el año

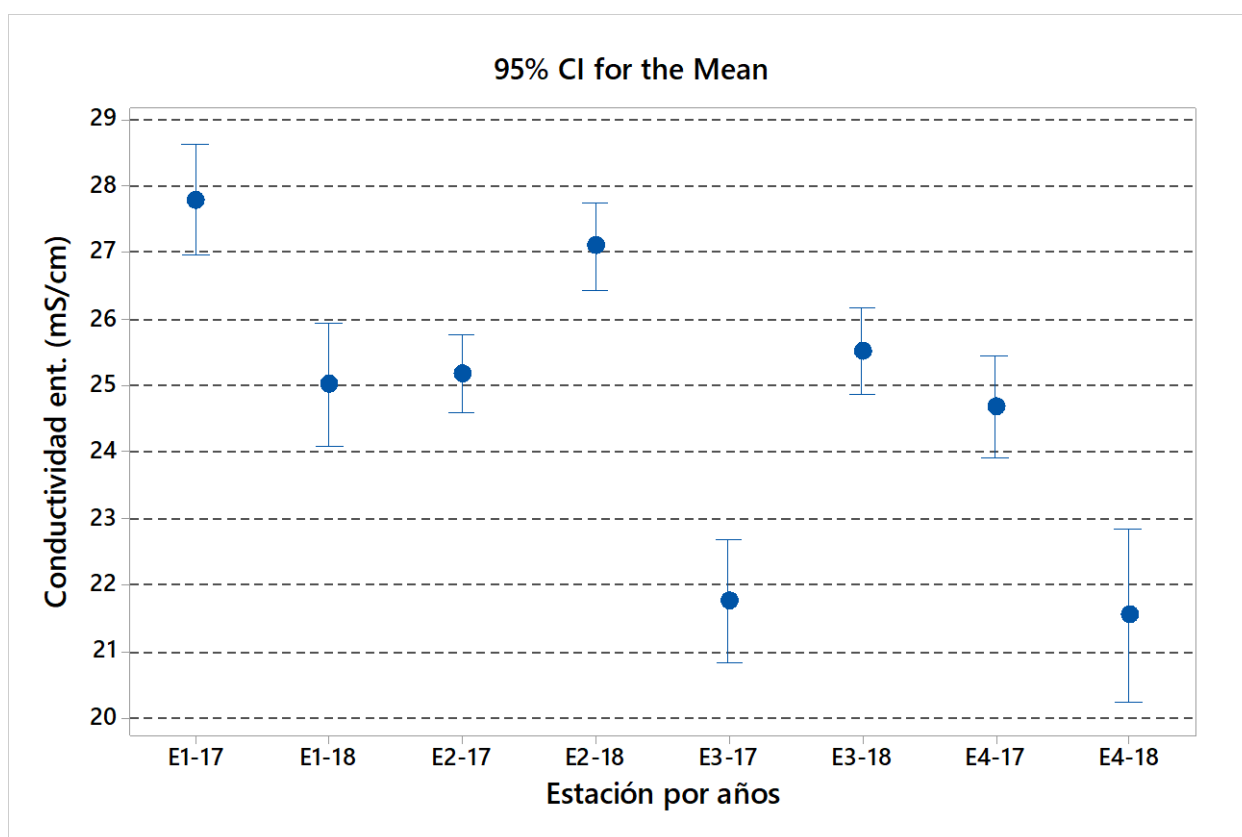


Fig. 24 Intervalos de confianza para la media de la variable conductividad entrada según la estación y el año

El valor-p de la prueba que se obtuvo fue menor de 0,05, indicando que la prueba realizada tiene valor estadístico al menos una de las estaciones es diferente del resto. En las tablas 14 y 15 podemos ver estas diferencias. En caso de la conductividad de entrada tenemos tres grupos pertenecientes a tres letras A B y C y ninguno comparte similitud con el otro grupo. La conductividad más alta tuvimos en E1-17 y E2-18, en cambio las más bajas en las estaciones E3-17 y E4-18. La comprensión de estos comportamientos necesita un análisis más profundo y registro de las actividades realizadas en la planta de la depuradora.

**Tabla 14: Comparación de las medias de Conductividad entrada**

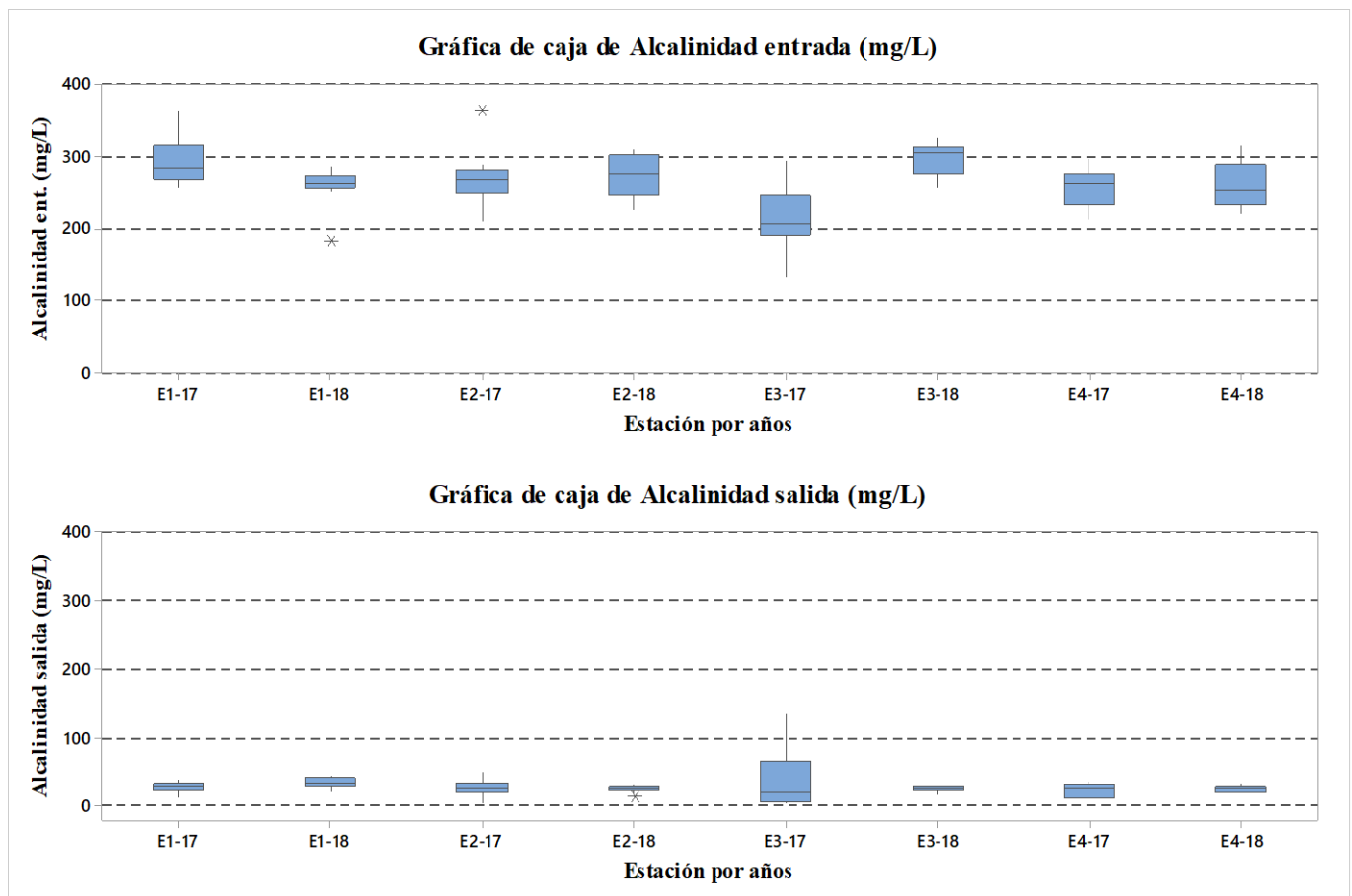
Estación por años	Numero de datos	Media mS/cm	Agrupación
E1-17	64	27,796	A
E2-18	55	27,098	A
E3-18	61	25,529	B
E2-17	61	25,178	B
E1-18	63	25,035	B
E4-17	59	24,684	B
E3-17	61	21,774	C
E4-18	61	21,545	C

**Tabla 15: Comparación de las medias de Conductividad salida**

Estación por años	Numero de datos	Media mS/cm	Agrupación
E2-18	55	12,817	A
E3-18	61	12,348	A B
E1-18	63	11,921	B
E1-17	64	11,849	A B
E3-17	62	11,758	B
E4-18	61	10,8059	C
E4-17	59	10,706	C
E2-17	60	10,645	C

## 2.3 Alcalinidad

En capítulos anteriores hemos hablado de la importancia de alcalinidad para el funcionamiento óptimo de la depuradora. En la figura 25 se representa gráfica de cajas de la alcalinidad a la entrada y salida de la depuradora por estaciones de cada año. Vemos que agua residual tiene una alcalinidad de unos 250 mg/L y en cambio agua depurada ronda a unos 50 mg/L concretamente como se vio en la tabla 6 la media es 28,02 mg/L.



**Fig. 25** Diagramas de cajas para los valores obtenidos de Alcalinidad en la salida correspondientes a estación y año

Seguidamente representamos figuras 27 y 28 donde comparamos las medias de las estaciones de los dos años. Se observa un comportamiento inusual durante la estación 3 de 2017. Una alcalinidad baja en la entrada debe ser compensada añadiendo el producto adecuado evitando así un desequilibrio del sistema.

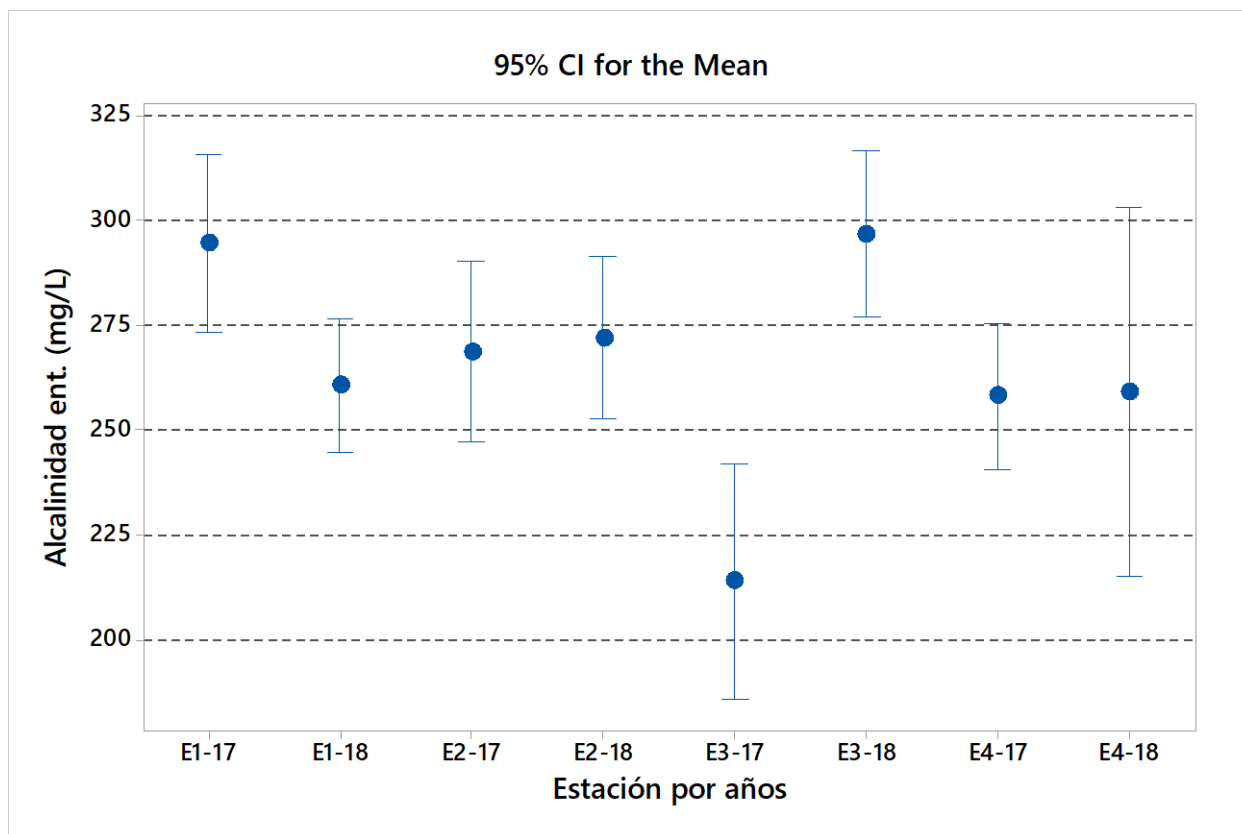


Fig. 276 Intervalos de confianza para la media de la variable Alcalinidad entrada según la estación y el año

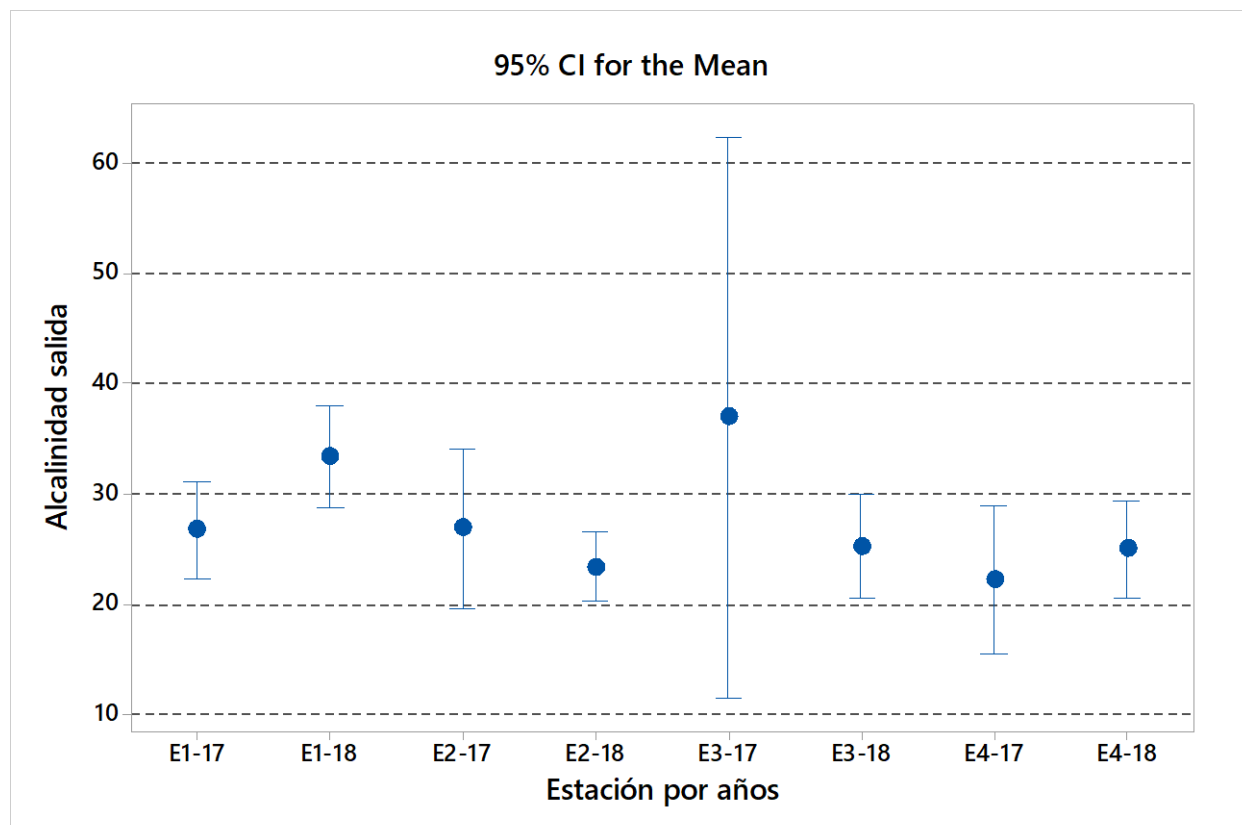


Fig. 267 Intervalos de confianza para la media de la variable Alcalinidad salida según la estación y el año

En la figura 28 se representa una evolución temporal del consumo de alcalinidad durante años 2017 y 2018. **El consumo de alcalinidad prácticamente se mantiene** a valores mayores de **80%**. Es muy importante tener en cuenta este resultado para evitar problemas de actividad biológica en la depuradora. Como dijimos en apartado **1.3** la alcalinidad ayuda a mantener estable el pH de agua residual así pudiendo desarrollar correctamente la depuración biológica. En la E3-2017 se observa un descenso importante en el consumo de alcalinidad que corresponde a un periodo en que la nitrificación no funcionó correctamente como se observara posteriormente.

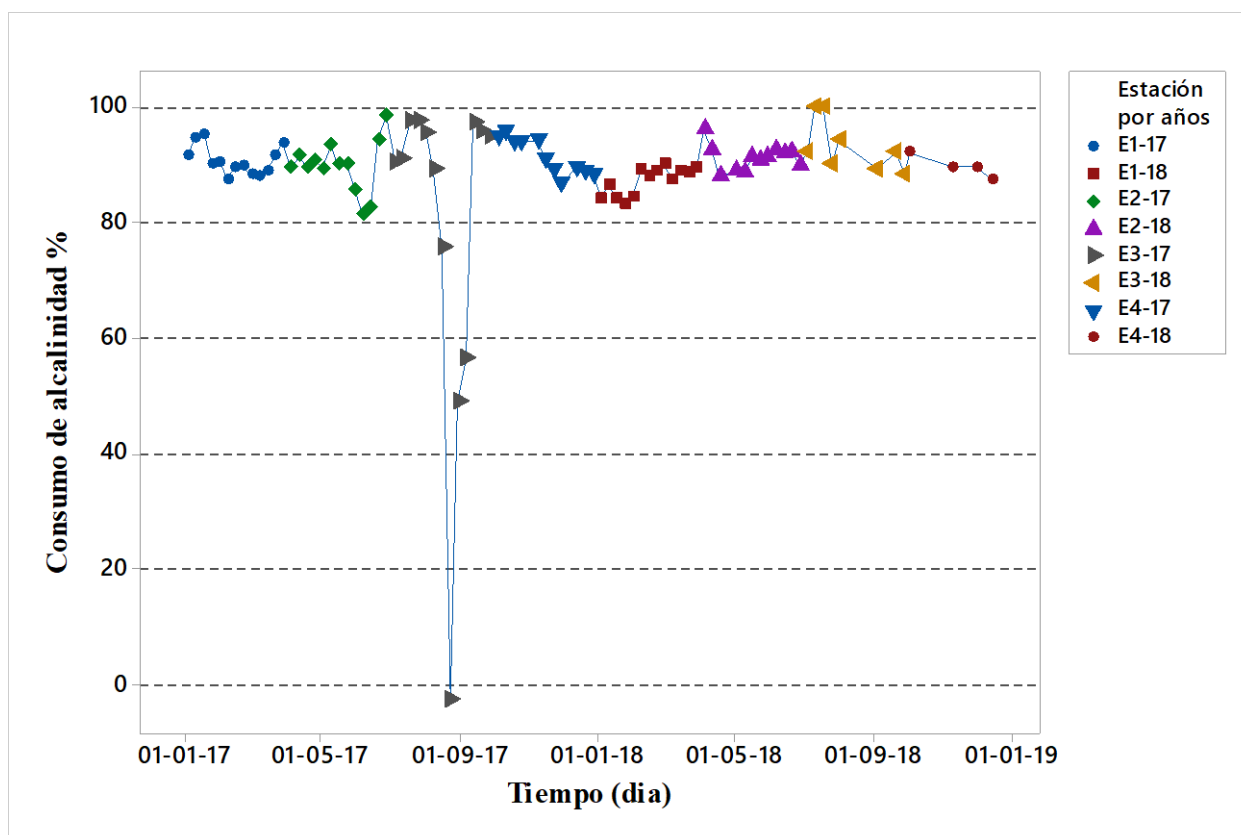


Fig. 28 Evolución temporal del consumo de alcalinidad por estaciones



El p-valor de la prueba realizada de la comparación de las medias de alcalinidad a la entrada de la depuradora es menor de 0,05. Vemos en la tabla 16 que prácticamente todos son iguales exceptuando E3-17 que tiene un valor menor que otras estaciones, este menor valor podría ser unas de las causas del mal funcionamiento de la instalación por falta de alcalinidad. Hablando estadísticamente no podemos diferenciar respecto las estaciones que tienen la misma letra B, pero vemos que la media es relativamente menor que de otras estaciones.

**Tabla 16: Comparación de las medias de Alcalinidad a la entrada**

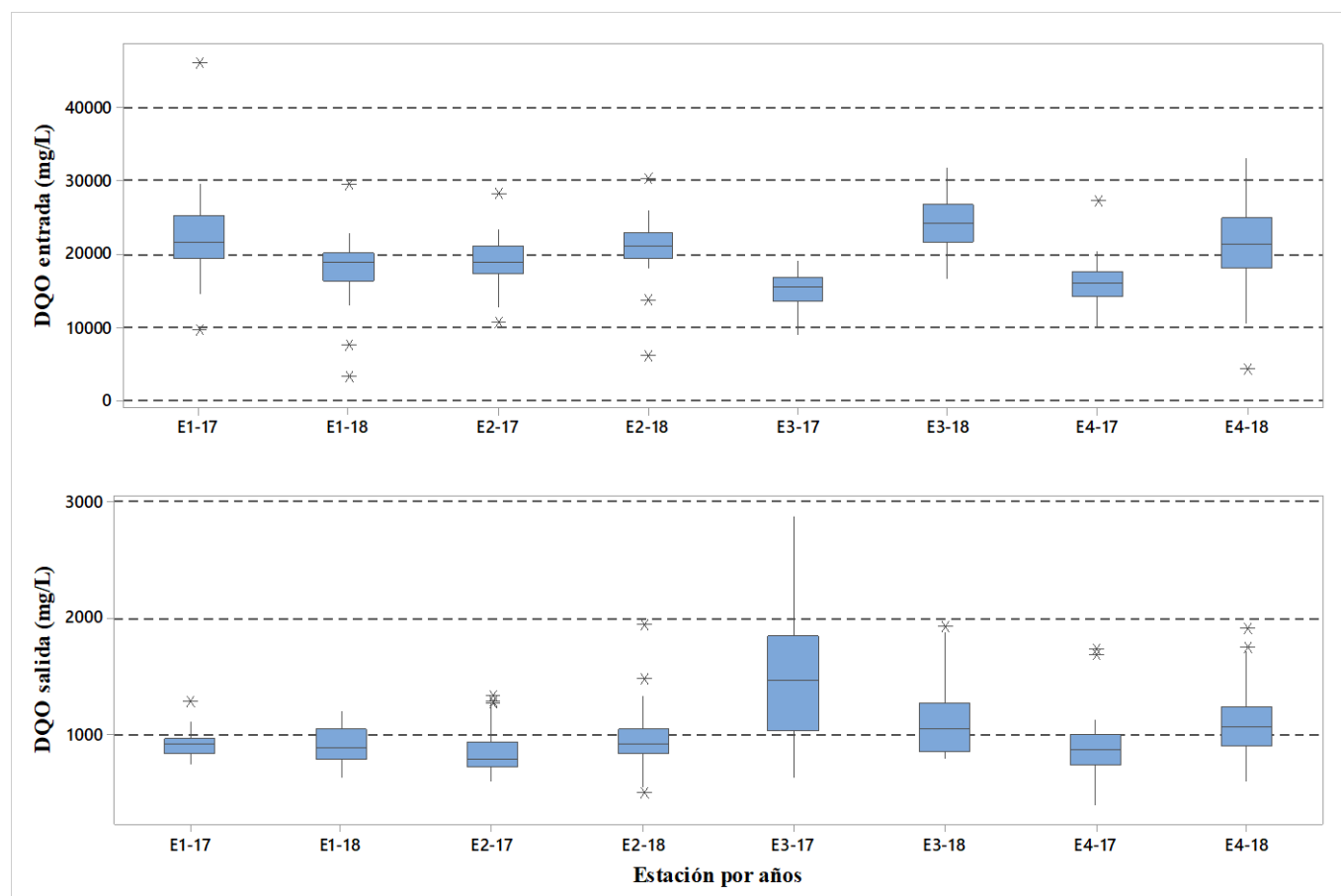
<b>Estación por años</b>	<b>Numero de datos</b>	<b>Media mg/L</b>	<b>Agrupación</b>	
E3-18	8	296,80	A	
E1-17	13	294,43	A	
E2-18	12	272,03	A	
E2-17	13	268,77	A	
E1-18	13	260,74	A	B
E4-18	5	259,2	A	B
E4-17	11	258,15	A	B
E3-17	13	214,1		B

En este apartado no estudiaremos ni presentaremos la comparación de las medias de alcalinidad a la salida de la depuradora porque vimos que no hay ninguna diferencia entre ellas y obtenemos un p-valor de 0,054.

## 2.4 DQO, demanda química de oxígeno

En este capítulo estudiaremos evolución de la DQO por estaciones de los dos años.

En la figura 29 se representan las gráficas de cajas por estaciones de la DQO. Si nos fijamos se ve que las cajas y los bigotes se solapan unas con otras por tanto aparentemente no hay diferencias significativas entre las estaciones.



**Fig. 29** Diagramas de cajas para los valores obtenidos de la DQO en la entada y salida de la depuradora correspondientes a estación y año

Realizamos estudio comparativo de las medias de la DQO para el agua de la depuradora a la entrada y salida del sistema de depuración biológica.

En la figura 30 se representa grafica de la DQO a la entrada de la depuradora. Vemos que es difícil destacar alguna estación en concreto del resto de las estaciones. **Aunque si nos fijamos bien las estaciones 3 y 4 de 2017** podrían ser significativamente diferente del resto de las estaciones.

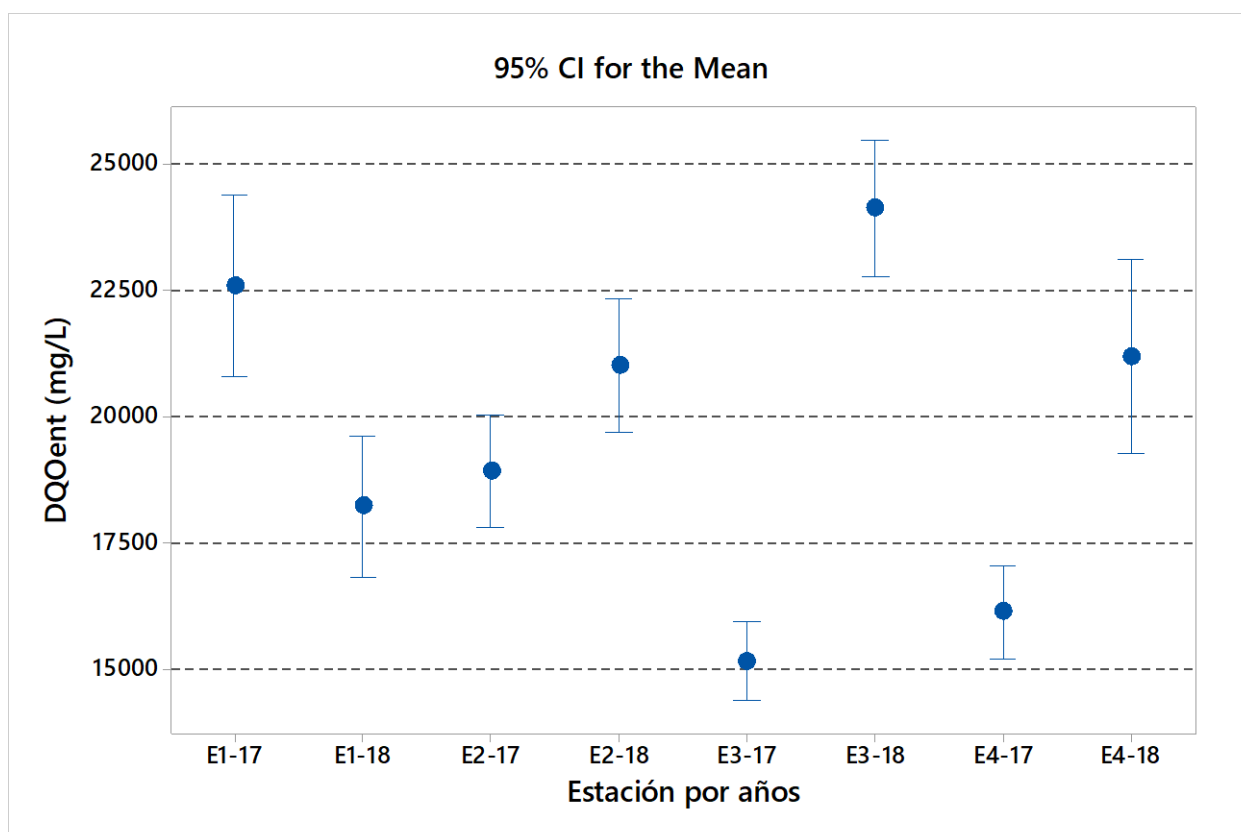


Fig. 30 Intervalos de confianza para la media de la variable DQO entrada según la estación y el año

El método del análisis de la variancia sin la suposición de igualdad de variancias (las variancias de los distintos grupos resultaron significativamente diferentes) se utilizó para valorar la igualdad o no de las medias correspondientes a la DQO entrada a los distintos periodos temporales. El valor-p de la prueba que se obtuvo fue menor de 0,0002, por lo que se pudo concluir que las DQO de entrada son significativamente diferentes. La separación de medias que proporcionó el método **Games-Howell** se presenta en la tabla 17.

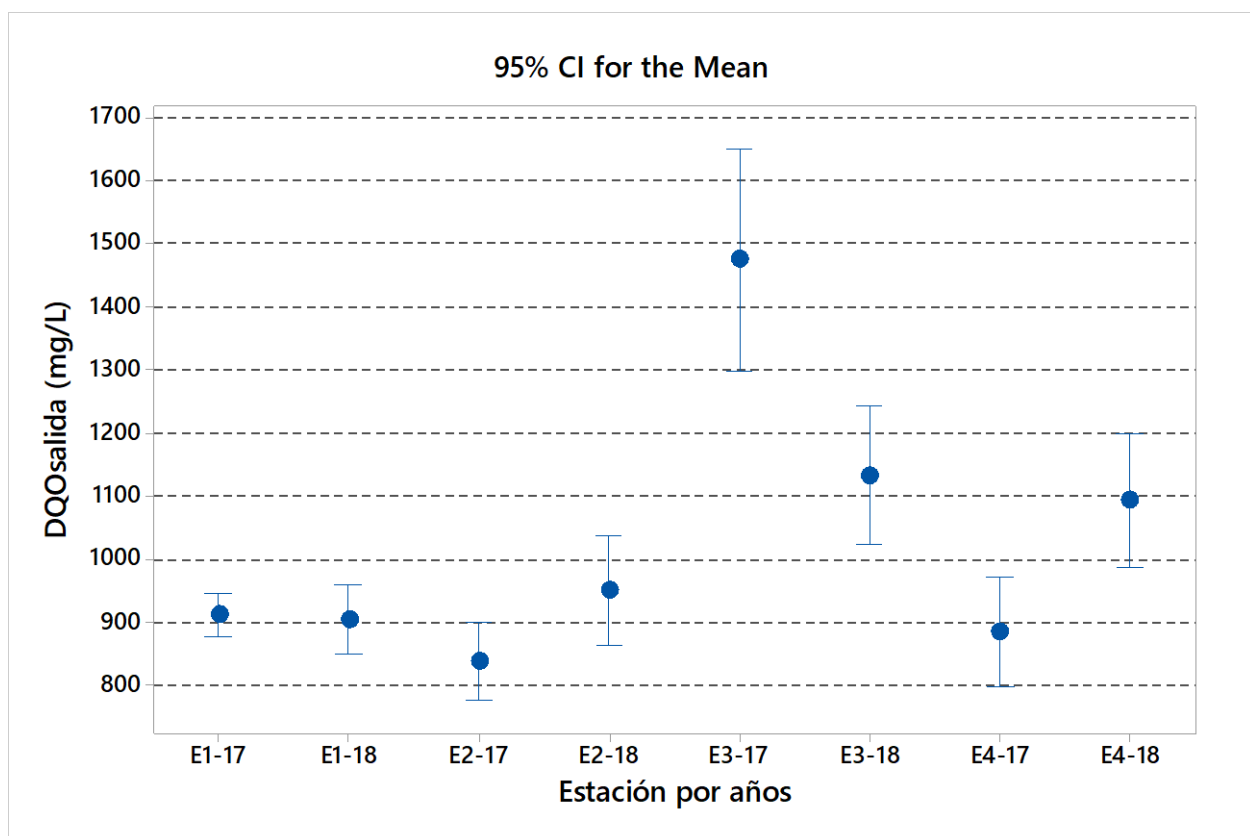
Tabla 17 Comparaciones en parejas de Games-Howell para la DQO entrada

Estación por años	Numero de datos	Media mg/L	Agrupación
E3-18	34	24126	A
E1-17	40	22583	A B
E4-18	38	21184	A B C
E2-18	35	21008	B C
E2-17	35	18926	C
E1-18	38	18218	C D
E4-17	39	16135	D E
E3-17	37	15172	E

En la tabla 17 cada letra (A-E) corresponde a un grupo de medias homogéneo, así, los que tienen la misma letra están en el mismo grupo, esto es, no hay diferencias entre estas estaciones. Por tanto, aunque la estación 3 de 2017 sea diferente de otras estaciones menos estación 4 de 2017 este a su vez tiene similitud con el E1 de 2018 y así sucesivamente.

Como conclusión **no podemos diferenciar significativamente ninguna de las estaciones del resto**. Pero podemos observar que la **estación 3 de 2017 tiene un valor mínimo de la DQO**. Esto junto con variaciones en otros parámetros podría haber afectado al proceso habitual de la depuración.

Realizamos mismo estudio para la DQO a la salida de la depuradora. Comparamos las medias de las estaciones. En la figura 31 se aprecia muy claramente la diferencia al menos de una estación del resto de las estaciones.



**Fig. 31 Intervalos de confianza para la media de la variable DQO salida según la estación y el año**

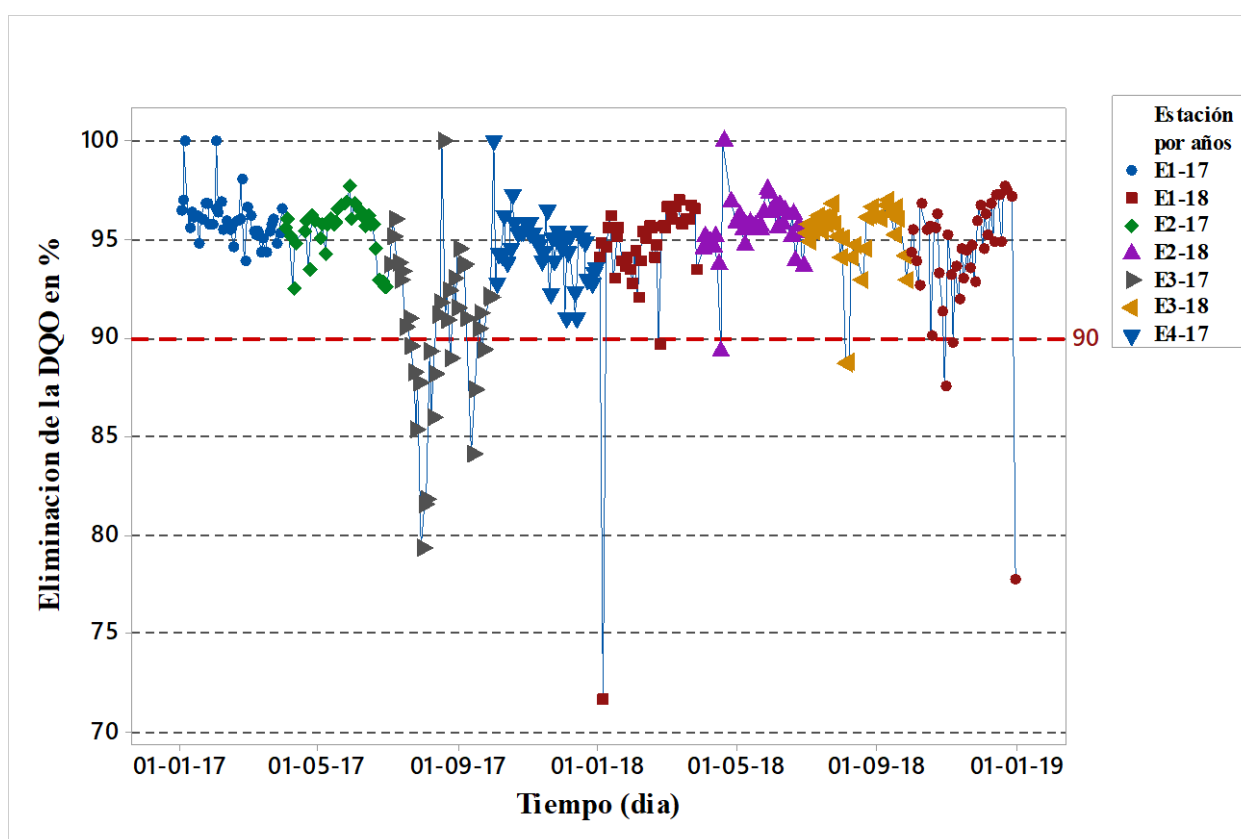
Efectivamente la estación 3 de 2017 es significativamente diferente del resto de las estaciones. El valor-p de la prueba que se obtuvo fue menor de 0,0002. Haciendo comparaciones con el método **Games-Howell** se revalida la representación gráfica.

**Tabla 18: Comparación de las medias de la DQO salida**

Estación por años	Numero de datos	Media mg/L	Agrupación
E3-17	36	1474,8	A
E3-18	34	1133,3	B
E4-18	38	1093,6	B C
E2-18	36	951,9	B C D
E1-17	38	913,8	D
E1-18	38	905,9	D
E4-17	38	884,9	C D
E2-17	35	838,9	D

Aunque la media de la DQO de E3-17 era la más baja, la de salida es la más alta, seguramente debido a una menor desnitrificación debida a una nitrificación deficiente.

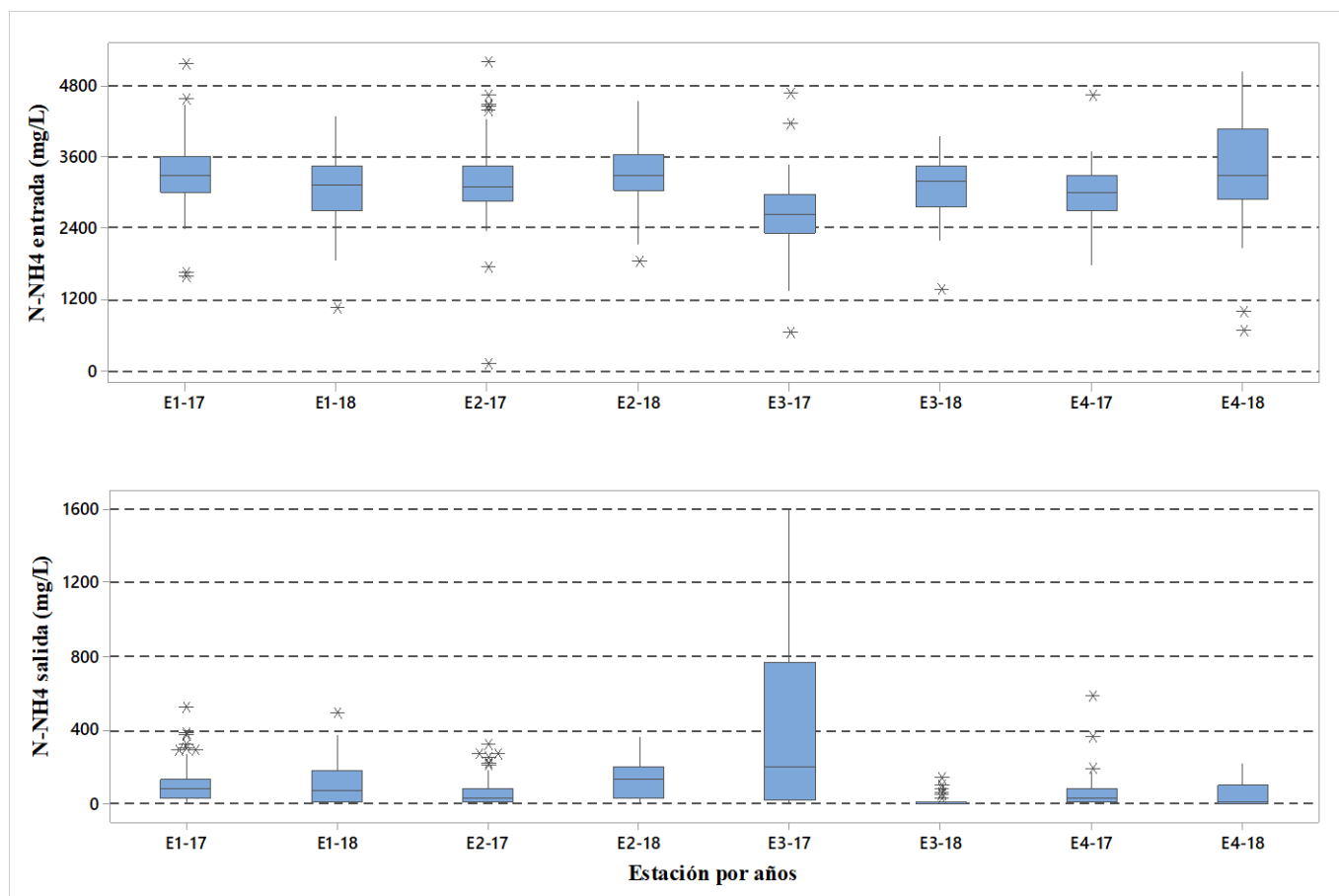
En la figura 32 se representa evolución temporal del consumo de la DQO con la línea roja marcando la referencia a 90 %. Se puede observar una vez más que la estación 3 de 2017 la depuración biológica tuvo problemas en el sistema impidiendo buen funcionamiento de la planta.



**Fig. 32 Evolución temporal de eliminación de la DQO de agua residual**

## 2.5 N-NH<sub>4</sub>, Nitrógeno amoniacal

Seguimos la misma metodología que en capítulos anteriores. Primeramente, vemos grafica de cajas de nitrógeno amoniacal por estaciones a lo largo de tiempo. Como se observa en la primera gráfica, figura 33, concentración de N-NH<sub>4</sub> de entrada se mantiene más o menos estable, pero la concentración de la salida en la estación 3 es muy variada por tanto la caja es mucho más amplia que de otros.



**Fig. 33 Diagramas de cajas para los valores obtenidos de nitrógeno amoniacal en la entada y salida de la depuradora correspondientes a estación y año**

**Estudiamos y comparamos las medias con el test de ANOVA para poder averiguar si alguna de las estaciones es diferente del resto.**

Haciendo comparación de las medias para concentración de nitrógeno amoniacal en el agua residual a depurar obtenemos que las medias son similares, no tenemos ninguna significativamente diferente del resto de las medias. El test tiene un p-valor menor de 0,05. En la figura 34 observamos las comparaciones.

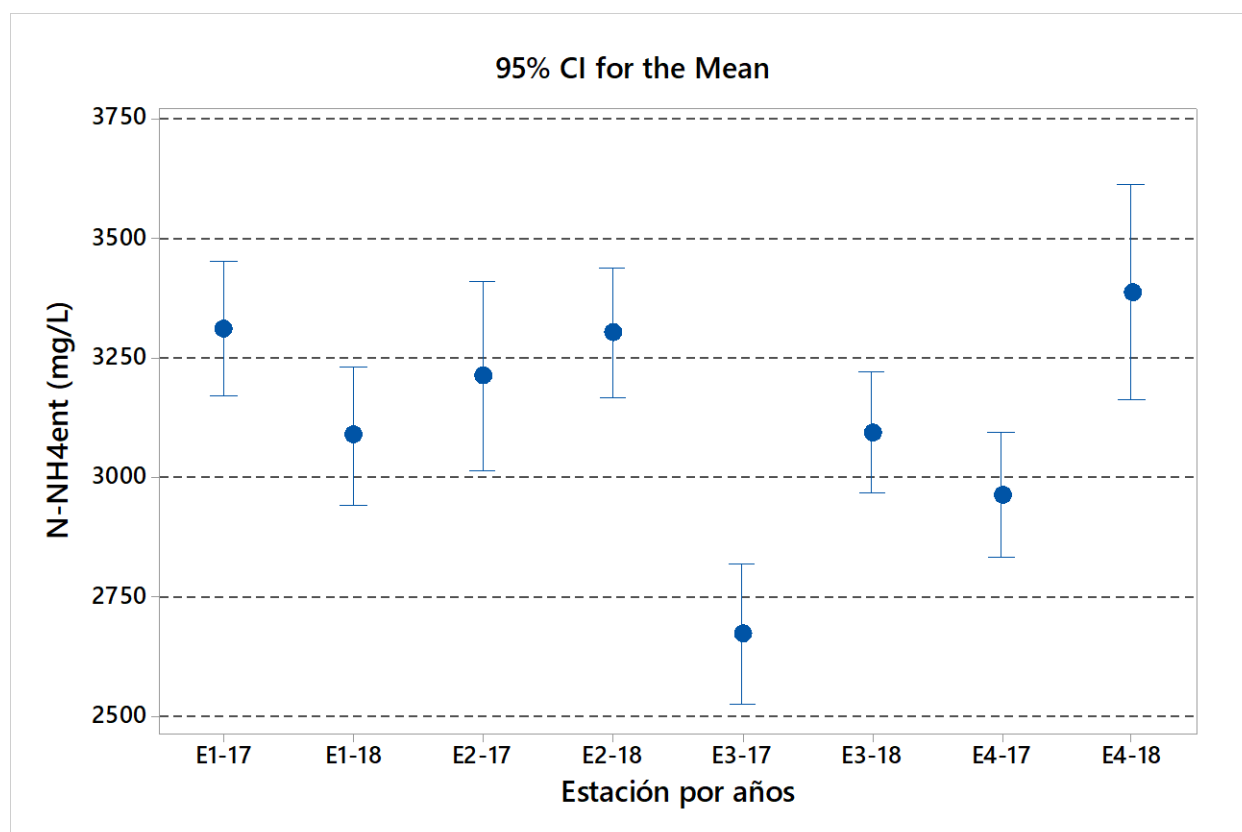


Fig. 34 Intervalos de confianza para la media de la variable  $N-NH_4^+$  entrada según la estación y el año

Estación por años	Numero de datos	Media mg/L	Agrupación	
E4-18	61	3386	A	
E1-17	64	3310,4	A	
E2-18	56	3302,6	A	
E2-17	61	3211,7	A	B
E3-18	61	3093,1	A	B
E1-18	63	3087,9	A	B
E4-17	59	2963,3	B	C
E3-17	61	2675,4		C

Tabla 19: Comparación de las medias de  $N-NH_4^+$  entrada

A pesar de resultado me gustaría recalcar que **la media de la estación 3 de 2017 es relativamente baja** comparando con el resto de las estaciones, igualmente lo hemos visto para la DQO y la alcalinidad indicando un cambio en las características del agua residual.

La concentración de nitrógeno amoniacal del agua a la salida de la depuradora también es muy variada. En la figura 35 vemos comparación de las medias por estaciones de los dos años separados. Aquí tenemos **2 de las estaciones** con una **diferencia significativa** entre sí y del resto de las estaciones que son la **estación 3 de 2017** y **estación 3 de 2018**. El p-valor de test de la prueba es menor de 0,05, por lo tanto, el resultado es significativo estadísticamente. Este resultado también se representa en la tabla 20.

**Tabla 20: Comparación de las medias de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> salida**

<b>Estación por años</b>	<b>Numero de datos</b>	<b>Media mg/L</b>	<b>Agrupación</b>	
E3-17	62	420,2	A	
E2-18	57	132,4	B	
E1-17	64	114,2	B	C
E1-18	63	111,2	B	C
E4-17	59	62,2	C	D
E2-17	60	61,4	C	D
E4-18	61	47,21		D
E3-18	61	12,56		E



La media de la estación 3 de 2017 es muy alta comparando con el objetivo de la depuradora lo que indica un problema en el sistema de la depuración biológica. En cambio, el valor bajo de **la estación 3 de 2018 no sería preocupante ya que cumple el objetivo fijado** para la depuración.

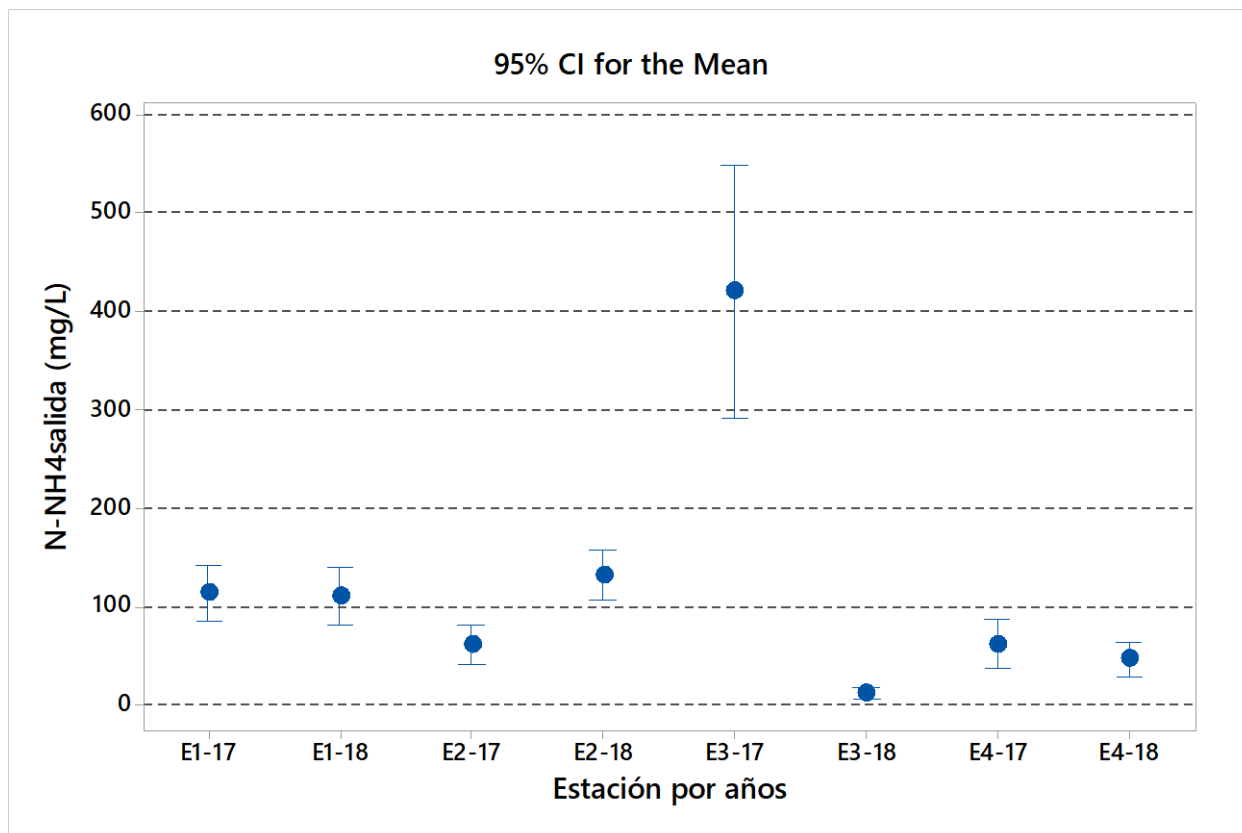
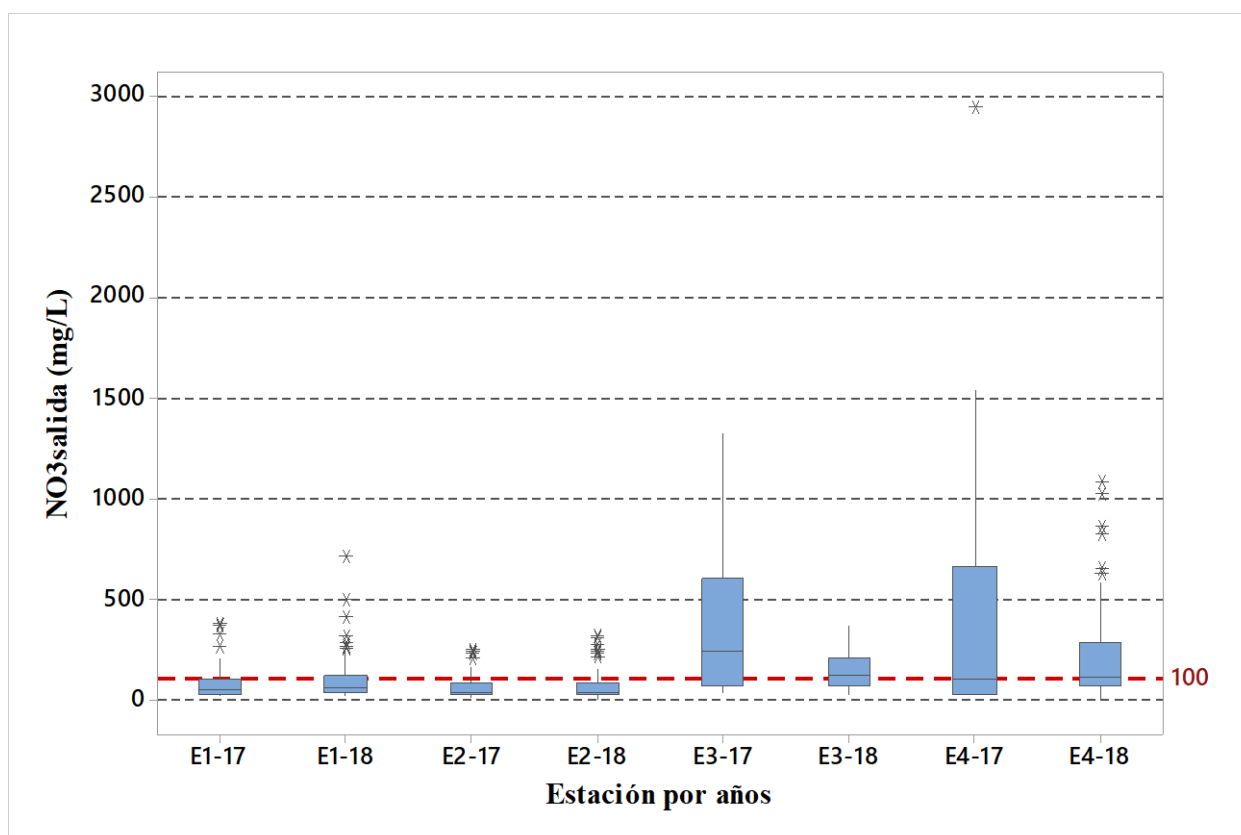


Fig. 35 Intervalos de confianza para la media de la variable N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> salida según la estación y el año

## 2.6 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Concentración de nitratos

Concentración de los nitratos es uno de los parámetros que ayuda a controlar sistema de la depuración biológica, tal como ya comentamos en capítulo 1.7. Conocer su evolución temporal puede ayudarnos a saber motivos de cambios de contenido de agua residual o sugerir indicaciones de cómo actuar.

En la figura 36 se representa grafica de cajas de la concentración de nitratos a la salida de la depuradora. Vemos que la estación 3 y 4 de 2017 tienen una amplitud mayor que resto de las estaciones. Lo que significa que no se cumplieron objetivos. Acordemos que el objetivo de concentración de nitratos es bajar a 100 mg/L. Con la línea discontinua roja se representa concentración de nitratos del objetivo.



**Fig. 36** Diagramas de cajas para los valores obtenidos de la variable NO<sub>3</sub>- correspondientes a estación y año

Si representamos grafica de intervalos de confianza para la media con 95% obtenemos figura 37.

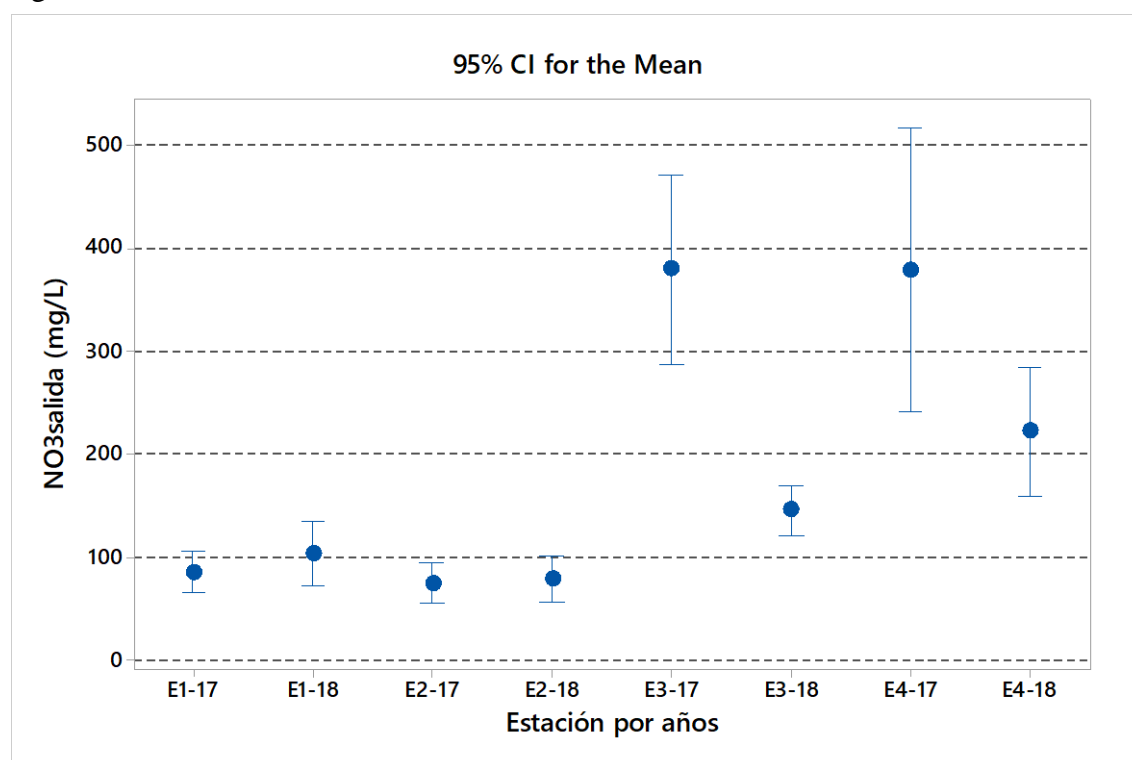


Fig. 37 Intervalos de confianza para la media de la variable NO<sub>3</sub><sup>-</sup> salida según la estación y el año

En la prueba tenemos un p-valor mucho menor de 0,05. El resultado indica que hay diferencias significativas entre las estaciones. Este hecho se aprecia aún más en la tabla 21. Una vez más la variabilidad entre las estaciones es visiblemente grande. Tenemos 4 grupos de datos. Unos tan bajos como la E2-17 y algunos tan altos como la media de E3-17. El objetivo es disminuir la concentración a 100 mg/L por tanto las concentraciones de las estaciones E3-17, E4-17 o incluso E4-18 son muy altos y estadísticamente, como vemos en la tabla 21, se diferencian de las otras estaciones exceptuando a E4-18. Estos valores tan altos indican directamente a una anomalía en el tratamiento biológico de agua residual.

Tabla 21: Comparación de las medias de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Estación por años	Numero de datos	Media mg/L	Agrupación			
E3-17	62	380,2	A			
E4-17	59	379,5	A			
E4-18	61	222,6	A	B		
E3-18	61	146,1	B	C		
E1-18	63	103,7	C		D	
E1-17	64	86,2			D	
E2-18	56	79,1			D	
E2-17	59	75,20			D	

### 3. Comparación de los parámetros de funcionamiento de los reactores biológicos

Los sistemas de fangos activos se controlan mediante una serie de parámetros indicados en la tabla.

Se ha intentado determinar el régimen de trabajo de la instalación, pero la complejidad de la instalación lo dificulta. En el manual de operación únicamente habla de un tiempo de retención celular no superior a 50 d con lo que estaríamos hacia un sistema de muy baja carga adecuado para tratar este tipo de aguas residuales con bajo índice de biodegradabilidad. Para calcular este parámetro en condiciones reales se necesita el caudal de purga y su concentración que se desconocen a nivel de la explotación.

Si se ha detectado que la relación entre los SSV (sólidos suspendidos volátiles) y los SST (sólidos suspendidos totales) del reactor es decir la parte volátil (la que correspondería a biomasa depuradora) respecto a la total es mucho más baja (0,67 y 0,66 en los años 2017 y 2018 respectivamente) de lo que suele ser (>80%) lo que indica que los reactores están trabajando con una porción de sólidos que no aportan nada al proceso, ya que son inorgánicos y que cargan las membranas de UF sin aportar nada a la depuración. Observaciones propias mostraban la presencia de muchas fibras en el agua de entrada y en las muestras del retenido. Tendría que estudiarse en detalle como eliminarlas en el pretratamiento.

**Tabla 22: Clasificación de los tipos de lodos activos segun la carga masica de trabajo**  
(Metcalf i Eddy, 2003 modificat)

Régimen de trabajo	Carga másica CM kgDBO <sub>5</sub> /kg SSV·d	Carga Volumétrica kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> (reactor)·d	Tiempo de retención celular θ <sub>c</sub> (d)	Tiempo retención hidráulica θ(h)	Concentración de la purga mgSST/L	Eliminación de DBO %
Carga alta	1,5 – 2	1,2 – 2,4	0,5-2	1,5 – 3	200-1000	<80
Carga media (convencional)	0,2 – 0,6	0,3 – 1,6	3-15	3-5	1500-4000	80-90
Carga baja (aireación prolongada)	0,04 – 0,1	0,1 – 0,3	20-30	18-36	3000-6000	>90

## Conclusiones

Respecto a las características del agua a tratar:

- Se constata que se trata de un agua residual con un altísimo contenido en DQO y nitrógeno amoniacal lo que justifica la complejidad de la instalación.
- Observamos que la planta trabaja casi siempre con unos valores de contaminantes superiores utilizados por su diseño, solamente 17,8 % y 24,2% de veces se trató al AR según el diseño para la DQO y  $\text{N-NH}_4^+$  respectivamente.

Respecto al funcionamiento de la depuración se observa:

- Alta eficiencia en la eliminación de DQO (97,3 % de eliminación) obteniéndose una DQO de salida adecuada para su vertido al alcantarillado (1500 mg/L) en el 91% de los muestreos.
- Eliminación de amonio también es alta, aunque quedando a un porcentaje de eliminación relativamente menor que la de DQO, llegando a un valor de 78,2 %.

Del estudio estacional:

- No se ha observado un patrón en las características de las aguas de entrada.
- La estación 3 de 2017 ha tenido un comportamiento inusual comparando con otras estaciones, obteniéndose diferencias estadísticamente significativas para la DQO y  $\text{N-NH}_4^+$  salida respecto al resto de estaciones. Tanto en DQO como en  $\text{N-NH}_4^+$  se han obtenido unos valores máximos que indican que el sistema de depuración biológica ha tenido algún tipo de anomalía significativa. Los datos indican que el problema pudo ser la falta de alcalinidad. Durante el año 2018 no se ha vuelto a repetir.

Sobre los reactores:

- No se ha podido calcular el régimen de trabajo de la instalación.
- El parámetro tiempo de retención celular tendría que controlarse y para ello es necesaria saber el caudal de purga y su concentración.
- Los sólidos del reactor presentan una parte importante inorgánica que no aporta nada a la depuración y sobrecarga la UF.

## Bibliografía

- Metcalf and Eddy, Inc. (2003) Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed., McGraw-Hill, New York
- MULDER, A., VAN DE GRAAF, A.A., ROBERTSON, L.A. y KUENEN, J.G., 1995. Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 16, no. 3, pp. 177-183. ISSN 15746941. DOI 10.1016/0168-6496(94)00081-7
- Flotats Ripoll Xavier, et al. *Curso 4,( 2016) De Residuo a Recurso: El camino hacia la sostenibilidad, Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 978-84-8476-629-2*
- Schmidt I., Hermelink C., de Pas-Schoonen K., Strous M., den Camp H.J.O., Kuenen J.G., and Jetten M.S.M. (2002) *Anaerobic ammonia oxidation in the presence of nitrogen oxides (NOx) by two different lithotrophs*. Appl. Env. Micr. 68(11), 5351-5357
- TOBERGTE, D.R. y CURTIS, S., 2013. *Tratamiento de aguas residuales*. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796
- TORRE, J.A.C., 2014. *Fangos activos: eliminación biológica de nutrientes* [en línea]. S.l.: Garceta. Colección Escuelas / Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. ISBN 9788415452843
- [www.ecoparcbcn.com](http://www.ecoparcbcn.com)